共同研究報告書
整理番号第４４６号

斜面の崩落の検知センサーと検出システムの開発

共同研究報告書

平成２５年１月

独立行政法人土木研究所
応用地質株式会社
日本工営株式会社
川崎地質株式会社
株式会社大林組

Copyright © (2013) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

斜面の崩落の検知センサーと検出システムの開発
共同研究報告書　執筆者名簿

武士俊也	(独)土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム上席研究員
藤澤和範	元(独)土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム上席研究員
千田容嗣	(独)土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム総括主任研究員
石田孝司	(独)土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム主任研究員
中野　亮	(独)土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム交流研究員
坂野弘太郎	(独)土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム交流研究員
濱浦尚生	(独)土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム交流研究員
奥田慎吾	元(独)土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム交流研究員
田端裕司	元(独)土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム交流研究員
大塚康範	応用地質㈱エンジニアリング本部技術研究所所長
斎藤秀樹	応用地質㈱エンジニアリング本部技師長室副技師長
山下善弘	応用地質㈱エンジニアリング本部コンサルティング一部専任職
辻　雅樹	応用地質㈱関西支社ジオテクニカルセンター専門職
矢部　満	応用地質㈱計測システム事業部技術部グループリーダー
酒井康紀	応用地質㈱計測システム事業部技術部主任
稲垣　裕	日本工営㈱流域・防災事業部防災部専門部長
笠原亮一	日本工営㈱流域・防災事業部河川砂防部技師
黛　廣志	川崎地質㈱技術本部技術企画部部長
中田文雄	川崎地質㈱本社企画管理部情報企画管理室室長
鈴木敬一	川崎地質㈱事業本部探査技術部課長
高梨俊行	川崎地質㈱技術本部技術企画部課長
大村　猛	川崎地質㈱事業本部保全グループ課長
松本　伸	㈱大林組生産技術本部統括部長
山本　彰	㈱大林組技術研究所地盤技術研究部部長
吉村佳映	㈱大林組東京本店土木事業部企画部企画課
森田晃司	㈱大林組生産技術本部土工技術部技術第一課課長
稲川雄宣	㈱大林組技術研究所地盤技術研究部副課長
野地朋和	㈱大林組生産技術本部土工技術部技術第一課主任

【要　旨】

本報告書は土木研究所地すべりチームと民間企業 4 社が、平成 21 年度から平成 23 年度にかけて実施した共同研究「斜面の崩落の検知センサーと検出システムの開発」における成果をとりまとめたものである。

大規模な落石や斜面崩落が発生する前兆現象として落石や小崩落が発生する場合がある。こういった現象は目視で比較的確認しやすい現象である。しかし仮設防護柵を設置することで道路利用者がこの現象を認識することは困難となる。また、前兆現象の発生頻度と大規模な落石や斜面崩落の発生について観測された事例は少ない。そこで、仮設防護柵を用いて前兆現象と考えられる落石・小崩落を精度よく検知するためのセンサーを開発し、得られたデータから大規模な落石や斜面崩落の発生予測を行うシステムの検討を行った。

キーワード：**落石、斜面崩壊、仮設防護柵、前兆、検知システム、振動**

目　次

１．はじめに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-1
1.1　研究背景　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-1
1.2　研究目的と達成目標　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-1
1.3　活動履歴　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-2
1.4　実施工程　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-5

２．検知センサーの検討　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-1
2.1　前兆現象として落石を捉えた事例　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-1
2.1.1　事例の抽出　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-1
2.1.2　Ａ地区　　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-1
2.1.3　Ｂ地区　　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-7
2.1.4　Ｃ地区　　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-12
2.1.5　落石・崩壊の発生傾向分析　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-17
2.1.6　斜面崩落の前兆現象としての落石　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-24
2.2　仮設防護柵の設置事例　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-25
2.2.1　仮設防護柵設置に関する基準書　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-25
2.2.2　既往の設置事例調査結果　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-30
2.3　検知センサーの検討　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-33
2.3.1　検知対象とする現象　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-33
2.3.2　除去すべき現象　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-33
2.3.3　落石の検知に適したセンサーの選定　・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-36
2.3.4　検知センサーに求められる性能　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-37

３．検知センサーの基礎実験　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-1
3.1　土木研究所構内基礎実験　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-1
3.1.1　実験目的　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-1
3.1.2　仮設防護柵　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-1
3.1.3　実験計画　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-4
3.1.4　実験結果　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-10
3.2　現地基礎実験　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-26
3.2.1　実験目的　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-26
3.2.2　実験地の概要　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-26
3.2.3　実験計画　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-30

3.2.4　実験結果１（木製横矢板）　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　3-34
3.2.5　実験結果２（鋼製横矢板）　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　3-62
3.3　検知センサーに要求される性能　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　3-90
3.3.1　基礎実験で確認できたこと　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　3-90
3.3.2　検知センサーの性能　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　3-92

４．検知センサーの長期検証実験　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4-1
4.1　実験目的　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4-1
4.2　実験場所、仮設防護柵の概要　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4-1
4.2.1　実験場所　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4-1
4.2.2　仮設防護柵の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4-4
4.3　事前基礎実験　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4-7
4.3.1　実験計画　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4-7
4.3.2　実験結果　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4-9
4.4　長期検証実験　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4-38
4.4.1　検証実験期間　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4-38
4.4.2　実験計画　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4-38
4.4.3　実験結果　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4-49
4.5　検知センサーに要求される性能　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4-85
4.5.1　速度型崩落検知システム　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4-85
（仮設防護柵の落石・小崩落の規模を推定するシステム）
4.5.2　加速度型崩落検知システム　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4-87
（仮設防護柵の落石・小崩落の規模を推定するシステム）

５．発生源における岩盤振動計測実験　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-1
5.1　実験目的　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-1
5.2　実験場所と実験工程　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-1
5.2.1　実験場所　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-1
5.2.2　実験工程　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-1
5.3　実験方法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-4
5.3.1　対象岩塊の選定　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-4
5.3.2　地震計の設置　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-5
5.3.3　計測器　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-8
5.3.4　計測方法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-9
5.3.5　解析方法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-10

5.4　実験結果　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-11
5.5　岩盤振動計測実験で確認できたこと　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-21
5.6　本計測手法改良のための知見　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-21

6．道路管理のための落石頻度に関する目安値の検討　・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-1
6.1　目安値の設置方法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-1
6.1.1　前提条件　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-1
6.1.2　方法及び手順　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-2
6.2　事例分析　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-3
6.2.1　対象箇所　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-3
6.2.2　大規模変動事例　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-3
6.2.3　長期実証試験箇所での事例分析　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-11
6.3　目安値の提案　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-21
6.3.1　設定の手順　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-21
6.3.2　現地確認　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-22
6.3.3　基本試験・運用試験　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-25
6.3.4　目安値の設定・検証　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-26
6.3.5　実運用・見直し　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-36
6.4　目安値設定時の留意点　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-37
6.4.1　落石検知による崩落予測の課題と留意点　・・・・・・・・・・・・・・・・　6-37
6.4.2　目安値設定時の課題と留意点　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-38

7．提案する崩落検知システム　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-1
7.1　システムの概要　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-1
7.1.1　崩落検知システムの基本機構について　・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-1
7.1.2　導入目的とシステムの要件・種類および仕様　・・・・・・・・・・・・・・　7-3
7.2　共同研究で開発した崩落検知システム　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-5
7.2.1　速度型崩落検知システム　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-5
（仮設防護柵への落石・小崩落の規模を推定するシステム）
7.2.2　加速度型崩落検知システム　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-18
（仮設防護柵への落石・小崩落の発生のみを検知する崩落検知システム）
7.3　システム導入及び運用上の留意点　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-29
7.3.1　システム導入時の留意点　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-29
7.3.2　事前確認事項　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-30
7.3.3　システム稼働時の留意点　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-31

7.3.4　運用上の留意点　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-32

８．まとめ　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　8-1
8.1　開発技術の特徴　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　8-2
8.2　開発技術の概要　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　8-3
8.3　道路管理のための落石頻度に関する目安値　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　8-5
8.4　パイロット的仮設防護柵設置型落石検知システム運用マニュアルの作成・・・・・・・　8-5
8.5　開発技術を活用した今後の展開　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　8-5

〔参考資料〕

長期検証実験結果一覧　　－足尾長期検証実験－

（１）速度型崩落検知システム

（２）加速度型崩落検知システム

1. はじめに

1.1 研究背景

道路斜面が被災を受けた場合や道路のり面工事などの際に多く用いられる仮設防護柵は、必ずしも斜面からの具体的な落石や斜面崩落を適切に考慮し、設計・設置されたものではない。そのため、降雨や凍結融解、切土工事等で斜面の緩みが進行することにより、結果として想定外の落石や斜面崩落が発生し、仮設防護柵と通行車両が被災するといった事例の報告もある（写真-１，２）

写真 1.1 仮設防護柵被災事例

写真 1.2 仮設防護柵被災事例（奈良県撮影）

仮設防護柵は一般的に高さが数m以上あるため、道路利用者は仮設防護柵の山側の状況を把握できず、仮設防護柵が被災を受ける可能性を全く感知できない。一方で、大規模な落石や斜面崩落が発生する前兆現象として落石や小崩落が発生する場合があると考えられている。そのため、仮設防護柵で対応不可能な規模の適用範囲外の落石や斜面崩落の前兆現象を精度良く検知することで、道路利用者が被災を受ける前に道路を規制するなどのフェールセーフの道路管理手法が求められている。

1.2 研究目的と達成目標

本共同研究では、仮設防護柵設置区間の道路利用者の被災を未然に防ぐために、仮設防護柵にセンサーを設置することで落石・小崩落を検知し、それらの発生頻度から大規模な斜面変動の発生を検出するシステムの開発を目的とする。検知センサーの運用イメージを図 1.1 に示す。ここでは、仮設防護柵に検知センサーを取り付けることによりその振動特性（周波数特性、振幅特性など）から落石を検知する方式とする。併せて落石発生源における落石検知のため、

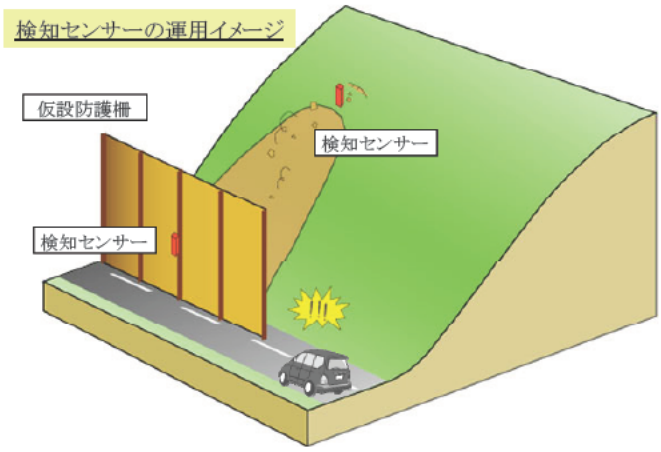


図 1.1 崩落検知センサーの運用イメージ

常時微動計測による不安定岩塊抽出技術の発展的活用手法についても検討を行う。

前記の研究目標を達成するため、本共同研究において、斜面崩落の事例から、前兆現象と考えられる落石・小崩落の発生傾向の分析を行う。また、これと平行して検知に要求される性能を満たすセンサーの開発・改良を行う。その上で実際の仮設防護柵を用いた実験を行う。ここでは、仮設防護柵に衝突する落石と落石以外の現象を周波数特性等から精度良く分離する手法、また複数のセンサーを設置した場合にも落石・小崩落の回数を重複なくカウントする手法などを検討する。これらを踏まえ、落石検出システムの開発を行う。その後、長期の現地実証試験により、システムの実用性や耐久性を評価・検証する。これらの結果を基に、パイロット的な仮設防護柵検知システム運用マニュアルとしてとりまとめる。このパイロット的運用マニュアルは、全国の国道等を対象とした試験運用の際に活用する予定である。また、発生源での落石検知については、常時微動計測による岩盤モニタリング手法を実斜面へ適用し、落石時の計測データを元にその効果を評価する。

本共同研究における達成目標を以下に示す。

① 斜面崩落の前兆現象として発生する落石の検知センサーの開発
② 崩落の発生を検出するシステムとして､検知した落石頻度から崩落を予測する目安値の提案
③ パイロット的仮設防護柵設置型落石検知システム運用マニュアルの作成

1.3 活動履歴

本共同研究は、平成 21 年 6 月 1 日から平成 23 年 5 月 31 日まで実施した。平成 21 年度は、既往の研究・検討結果の整理や斜面崩落前兆現象の検討を踏まえて開発すべき検知システムの基礎的検討を行った。また、土木研究所構内に設置した仮設防護柵、及び現道２箇所の仮設防護柵を対象とした実験により振動波形の計測を行った。平成 22 年度は過年度成果をもとに現地の仮設防護柵に対して、基礎実験に加えて長期実証試験を行い、検知システム・検出システムの確認及び検討を行った。平成 23 年度はこれらの研究成果の取りまとめとなる報告書の作成とパイロット的な運用マニュアルの執筆を行った。

上記共同研究を進めるにあたり、表 1.1 に示すワーキンググループを構成し、それぞれ連携して検討や実験及び執筆を行った。

表 1.1 ワーキンググループ構成とメンバー

ワーキンググループ名	メンバー
検知センサーグループ	応用地質株式会社 川崎地質株式会社 独立行政法人土木研究所
検出システムグループ	応用地質株式会社 株式会社大林組 川崎地質株式会社 日本工営株式会社 独立行政法人土木研究所

また、打合せや現地実験などの活動履歴を表 1.2 に示す。

表 1.2 活動履歴一覧

日付	打合せ名	実施内容
H21.7.1	初回全体打合せ	研究方針の確認 研究・実験の進め方について
H21.7.27	第1回全体打合せ	実験用仮設防護柵の仕様 構内実験計画と役割分担 前兆現象以外の振動要因と除去方法
H21.9.10-11	仮設防護柵設置工事	土木研究所構内への仮設防護柵設置
H21.9.15-16	実験施設設営	実験用施設設置
H21.10.5-6	第1回構内実験	仮設防護柵での衝撃力計測実験
H21.10.22	第2回構内実験	タンピングランマを用いた疑似振動波形計測実験
H21.11.10	第3回全体打合せ	土研構内実験の結果確認 今後の実験方針と研究方針の確認
H22.1.18	現地確認 （秩父土木事務所管内）	現地実験箇所の確認及び管理者との打合せ
H22.2.2	現地確認 （藤岡土木事務所管内）	現地実験箇所の確認及び管理者との打合せ
H22.2.10	現地実験 （藤岡土木事務所管内）	仮設防護柵（木矢板）を対象とした現地実験
H22.2.16	現地確認 （相模原市管内）	現地実験箇所の確認及び管理者との打合せ
H22.2.24	現地実験 （相模原市管内）	仮設防護柵（鋼矢板）を対象とした現地実験
H22.3.15	第4回全体打合せ	現地実験結果の中間報告 今後の実験方針 斜面崩落前兆現象を捉えた事例の確認 岩盤振動計を用いた発生源の計測計画
H22.6.11	第5回全体打合せ	中間報告読み合わせ 今後の構内実験及び現地実験の計画 落石発生源における検知手法 斜面崩落前兆現象の解析事例
H22.9.10	第6回全体打合せ	基礎実験および現場実証試験の計画 検知センサ配置のための基礎実験中間報告 現場実証試験の適地について 落石発生源における検知手法 斜面崩落動画や分析の集積・分析状況の報告
H22.9.24	長期実証試験 （足尾）	現地実験箇所の確認及び管理者との打合せ
H22.10.7	長期実証試験 （足尾）	現地確認
H22.11.12	第7回全体打合せ	長期実証試験について 長期実証試験の費用負担について 長期実証試験の概略工程について 落石発生源における検知手法 落石・崩落の発生傾向の分析について
H22.11.16-26	長期実証試験 （足尾）	仮設防護柵の設置
H22.11.17	長期実証試験 （足尾）	仮設防護柵の設置確認
H22.11.25	長期実証試験 （足尾）	電気工事

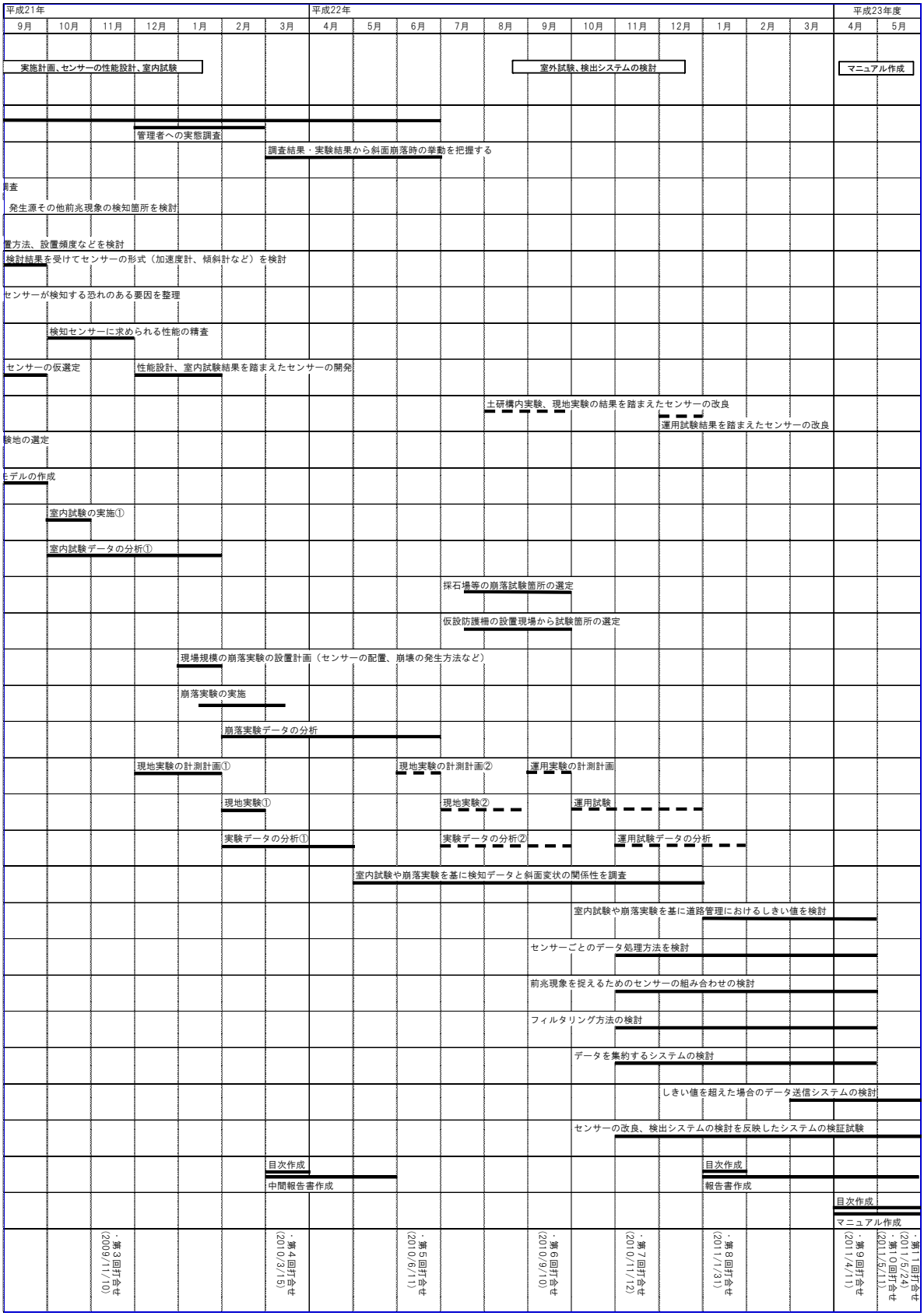
H22.12.7	長期実証試験 （足尾）	検知センサーの設置
H22.12.8	長期実証試験 （足尾）	検知センサーの設置 落石基礎実験
H23.1.11	長期実証試験 （足尾）	データ回収 落石発生源の検知センサーの設置
H23.1.12	長期実証試験 （足尾）	データ回収 落石発生源の実験 （渡良瀬川河川事務所、足尾砂防出張所見学）
H23.1.31	第8回全体打合せ	長期実証試験の回収データと基礎実験報告 落石発生源における検知手法 共同研究報告書について 運用マニュアルについて
H23.2.22	長期実証試験 （足尾）	データ回収 （1月12日16時以降　データなし）
H23.3.9	土研構内実験	仮設防護柵撤去の作業手順
H23.3.28	長期実証試験 （足尾）	データ回収
H23.4.11	第9回全体打合せ	長期実証試験の回収データ報告 長期実証試験の防護柵撤去について しきい値提案の方法（案）について 共同研究報告書と運用マニュアルについて
H23.4.12	土研構内実験	土木研究所構内での仮設防護柵撤去
H23.4.22	土研構内実験	データ回収（最終） 落石発生源の実験
H23.4.25-28	長期実証試験 （足尾）	仮設防護柵の撤去
H23.5.11	第10回全体打合せ	長期実証試験の回収データ報告 落石発生源の実験結果報告 共同研究報告書と運用マニュアルの読み合わせ
H23.5.24	第11回全体打合せ	長期実証試験の回収データ報告 落石発生源の実験結果報告 共同研究報告書と運用マニュアルの読み合わせ

1.4　実施工程

実施工程表を表 1.3 に示す。

表 1.3 実施工程表

研究項目	研究細目	検討項目	研究分担		共同研究者内の分担				平成21年		
			土木研究所	共同研究者	応用地質㈱	日本工営㈱	川崎地質㈱	㈱大林組	6月	7月	8月
研究体制の構築		・研究方針の確認 ・研究分担 ・特許の取扱い ・共同研究協定書 ・実施計画書の作成	◎	◎					協定書等 実施計画書		
①．前兆現象検知センサーの開発	①-1．前兆現象の事例収集・分析	①-1-1．斜面崩落事例の収集	◎	○	○	○	○	○		文献収集	
		①-1-2．前兆現象の挙動を把握	◎	○	○	○	○	○			
	①-2．センサーの性能設計	①-2-1．センサー設置箇所の検討	○	◎	◎	○	◎	○		研究事例調	研究事例調
		①-2-2．センサー設置方法の検討	○	◎	◎	○	◎	○		待ち受け、 研究事例調査	待ち受け、
		①-2-3．前兆現象を捉えるのに適したセンサーの検討	○	◎	◎	○	◎	○		設置する構造物、設	
		①-2-4．前兆現象以外にセンサーが検知する恐れがある要因の整理	○	◎	◎	○	◎	○		通行車両や風など、	
		①-2-5．検知センサーに必要な性能設計	○	◎	◎	○	◎	○			
	①-3．センサーの開発	①-3-1．センサーの開発	○	◎	◎	○	◎	○			
		①-3-2．試験結果等を反映したセンサーの改良	○	◎	◎	○	◎	○			
②検知センサーの運用試験	②-1．室内試験場の選定	②-1-1．土研構内等の試験地の選定	◎	○	○	○	○	○		土研構内他、室内試	
	②-2．室内試験	②-2-1．室内試験モデルの作成	○	◎	◎	○	◎	○			室内試験
		②-2-2．試験の実施とデータ収集	○	◎	◎	◎	◎	◎			
		②-2-3．収集データの解析	◎	○	◎	○	◎	○			
	②-3．現場試験地の選定	②-3-1．採石場等の試験地の選定	◎	○	○	○	○	○			
		②-3-2．仮設防護柵の設置現場の選定	◎	○	○	○	○	○			
	②-4．現場運用試験	②-4-1．崩落試験の設置計画	○	◎	◎	○	◎	○			
		②-4-2．試験の実施とデータ収集	○	◎	◎	◎	◎	◎			
		②-4-3．収集データの解析	◎	○	◎	○	◎	○			
		②-4-4．現場現象を捉える試験の設置計画	○	◎	◎	○	◎	○			
		②-4-5．試験の実施とデータ収集	○	◎	◎	◎	◎	◎			
		②-4-6．収集データの解析	◎	○	◎	○	◎	○			
③検出システムの開発	③-1．道路管理におけるしきい値の検討	③-1-1．検知データと斜面変状の関係性の調査	◎	○	◎	◎	◎	◎			
		③-1-2．道路管理におけるしきい値の検討	◎	○	◎	◎	◎	◎			
	③-2．検出システムの検討	③-2-1．センサーの種類や設置方法に対応したデータ処理方法を検討	○	◎	◎	◎	◎	◎			
		③-2-2．検知センサーの組み合わせの検討	○	◎	◎	◎	◎	◎			
		③-2-3．フィルタリング方法の検討	○	◎	◎	◎	◎	◎			
		③-2-4．データ集約方法の検討	○	◎	◎	◎	◎	◎			
		③-2-5．しきい値を超えた場合のデータ送信システムの検討	○	◎	◎	◎	◎	◎			
		③-2-6．検出システムの検証	○	◎	◎	◎	◎	◎			
④システムの運用マニュアル作成	④-1．パイロット的運用マニュアルの作成	④-1-1．研究成果の整理とりまとめ	◎	◎	◎	◎	◎	◎			
		④-1-2．パイロット的運用マニュアルの作成	◎	◎	◎	◎	◎	◎			
備　　考										・第1回打合せ(2009/07/01)	・第2回打合せ(2009/07/27)


平成21年
平成22年
平成23年度
9月
10月
11月
12月
1月
2月
3月
4月
5月
6月
7月
8月
9月
10月
11月
12月
1月
2月
3月
4月
5月
実施計画、センサーの性能設計、室内試験
室外試験、検出システムの検討
マニュアル作成
管理者への実態調査
調査結果・実験結果から斜面崩落時の挙動を把握する
調査
発生源その他前兆現象の検知箇所を検討
置方法、設置頻度などを検討
検討結果を受けてセンサーの形式（加速度計、傾斜計など）を検討
センサーが検知する恐れのある要因を整理
検知センサーに求められる性能の精査
センサーの仮選定
性能設計、室内試験結果を踏まえたセンサーの開発
土研構内実験、現地実験の結果を踏まえたセンサーの改良
運用試験結果を踏まえたセンサーの改良
験地の選定
モデルの作成
室内試験の実施①
室内試験データの分析①
採石場等の崩落試験箇所の選定
仮設防護柵の設置現場から試験箇所の選定
現場規模の崩落実験の設置計画（センサーの配置、崩壊の発生方法など）
崩落実験の実施
崩落実験データの分析
現地実験の計測計画①
現地実験の計測計画②
運用実験の計測計画
現地実験①
現地実験②
運用試験
実験データの分析①
実験データの分析②
運用試験データの分析
室内試験や崩落実験を基に検知データと斜面変状の関係性を調査
室内試験や崩落実験を基に道路管理におけるしきい値を検討
センサーごとのデータ処理方法を検討
前兆現象を捉えるためのセンサーの組み合わせの検討
フィルタリング方法の検討
データを集約するシステムの検討
しきい値を超えた場合のデータ送信システムの検討
センサーの改良、検出システムの検討を反映したシステムの検証試験
目次作成
中間報告書作成
目次作成
報告書作成
目次作成
マニュアル作成
・第3回打合せ（2009/11/10）
・第4回打合せ（2010/3/15）
・第5回打合せ（2010/6/11）
・第6回打合せ（2010/9/10）
・第7回打合せ（2010/11/12）
・第8回打合せ（2011/1/31）
・第9回打合せ（2011/4/11）
・第10回打合せ（2011/5/11）
・第11回打合せ（2011/5/24）

2. 検知センサーの検討

2.1 前兆現象として落石を捉えた事例

2.1.1 事例の抽出

本研究では、仮設防護柵の機能を上回る、地すべりや岩盤崩壊といった移動体本体の大規模な変動（以降、「斜面変動」と呼ぶ）の発生に関連して、これに先行しあるいは伴って移動体の周縁部や末端部で発生する、小規模な崩壊や落石を典型的な計測対象として認識している。

そこで、検知センサーの開発に向けた事例検討を目的として、このような対象としての条件に該当し、かつ落石や小崩壊の発生状況が連続的に把握されている以下の 3 事例を抽出した。

1) A 地区（地すべり）
2) B 地区（岩盤崩壊）
3) C 地区（注水試験による崩落）

2.1.2 A地区（地すべり）

(1) 地すべりの概要

① 位置及び概況

A地区はI川の左岸部に位置しており、2006 年 5 月 13 日に幅約 150m，長さ約 135m の規模で崩落した。当地区では 2006 年 4 月 21 日に地すべりによる変状が確認され、約 20 日後の崩落時には、CCTV3 基によって先行的な落石・崩壊現象を含めて地すべり挙動が記録されている。

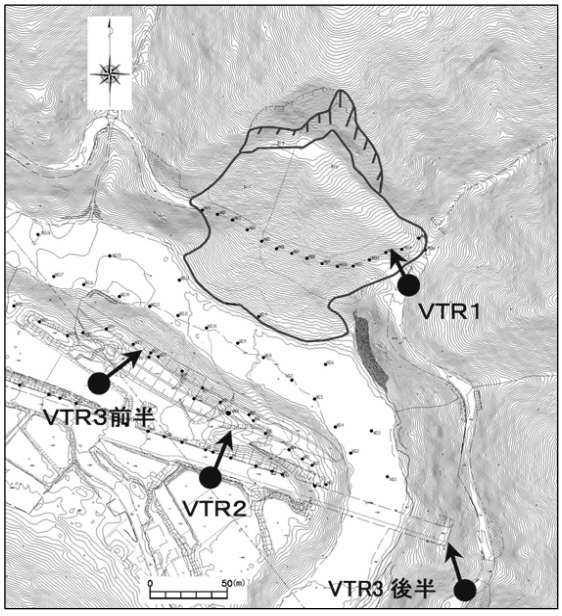


図 2.1 地すべり発生平面図[1)]

写真 2.1　A地区地すべり斜め写真 [1)]

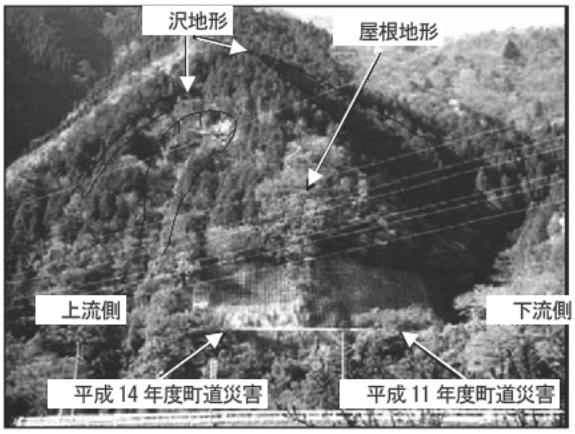


写真 2.2　崩壊前の地形 [2)]

② 地形・地質

1）地形

A地区地すべりはＩ川曲流部の左岸攻撃斜面に位置している。地すべり発生前の地形はやや深い沢地形にはさまれた尾根地形の末端付近に位置する。

2）地質

A地区地すべり周辺には、中～古生代・二畳紀のM帯が分布し、チャート、砂岩粘板岩互層、輝緑凝灰岩、石灰岩などから構成されている。地すべりが発生した地域には主に粘板岩（チャート含む）が分布している。地質構造は、概ねN70° E、50° Nの走向傾斜を示しており、地すべり発生斜面では受け盤状を呈している。

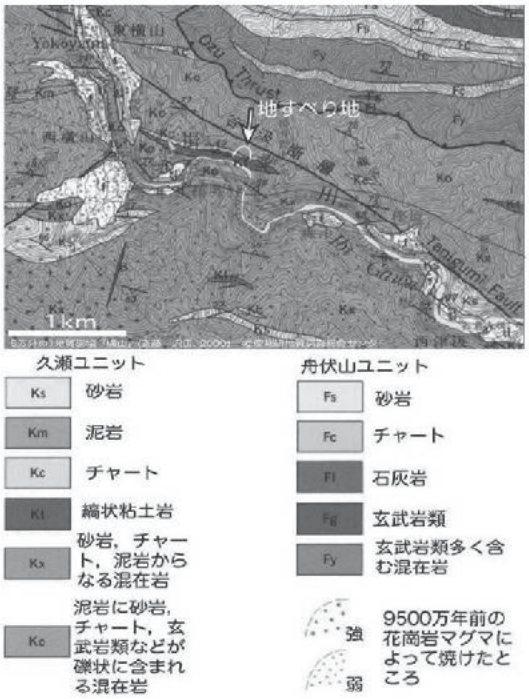


図 2.2　地すべり発生地周辺の地質図 [2)]

3）規模

A地区地すべりの規模を以下に示す。地すべりは地すべり中央部における幅 150m、主測線方向の長さが 135m、末端部と滑落崖の比高差が 135m であった。長さと比高差から求められる傾斜角は 47° であった。

表 2.1　崩壊規模一覧表

傾斜角（°）	47
比高差(m)	135
長さ(m)	135
幅(m)	150

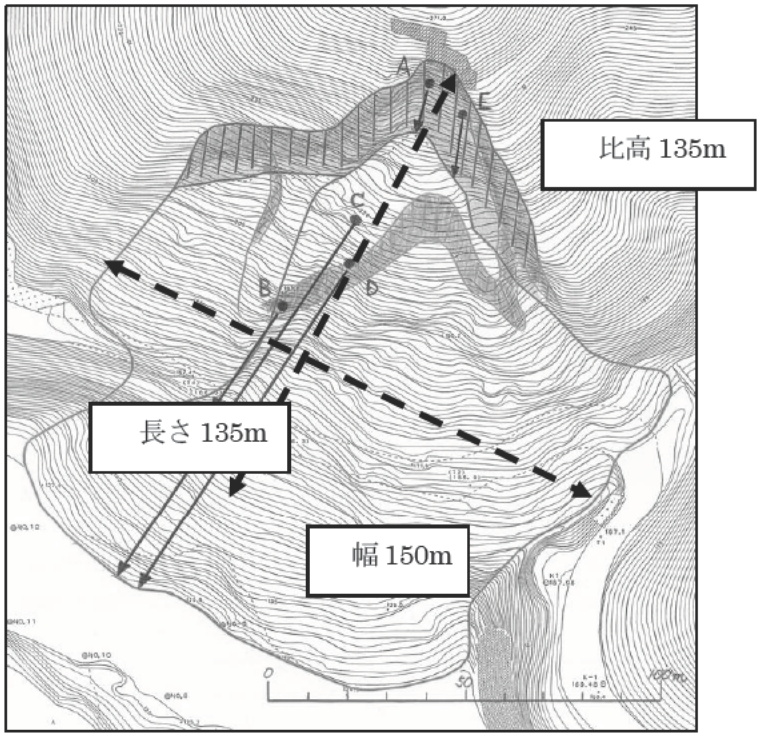


図 2.3　地すべり規模計測位置図 [1)]

(2) 落石の特徴

① 発生位置

A地区地すべりでは、合計6回にわたって規模の大きい崩壊が発生しており、これを「崩壊①～⑥」と名付けている。地すべり土塊の状況把握として、VTR映像を用いて崩壊③（5月12日22時40分頃）および崩壊⑥（5月13日8時00分頃に発生）について、崩壊直前の約20分間についてその過程を詳細に解析した。

崩壊③および崩壊⑥の変遷を表2.2および表2.3に示す。

表 2.2　崩壊③に至るまでの状況変化 [1)]

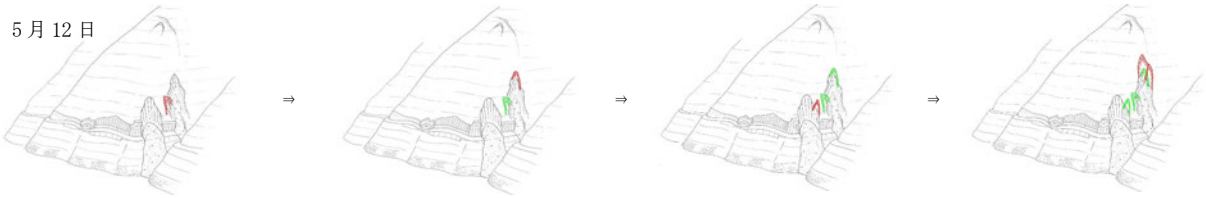
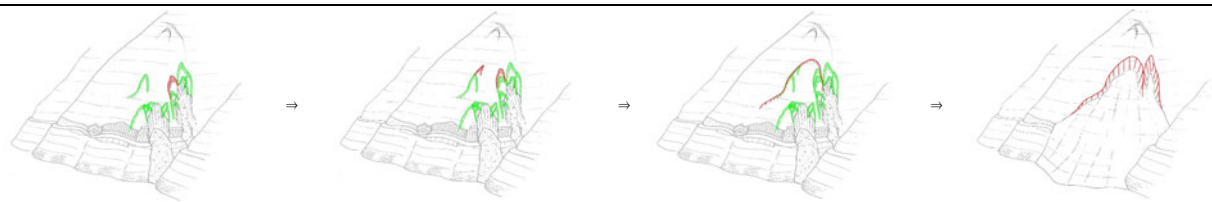
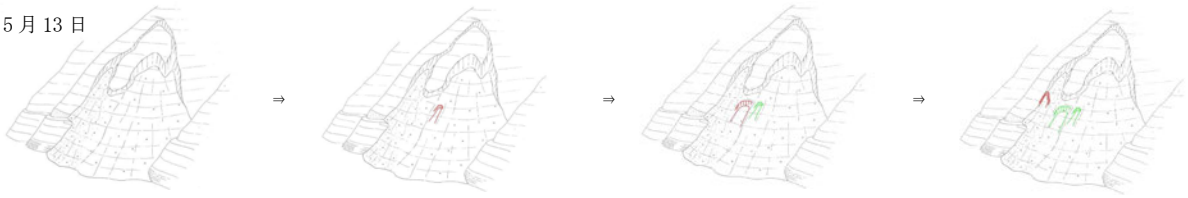
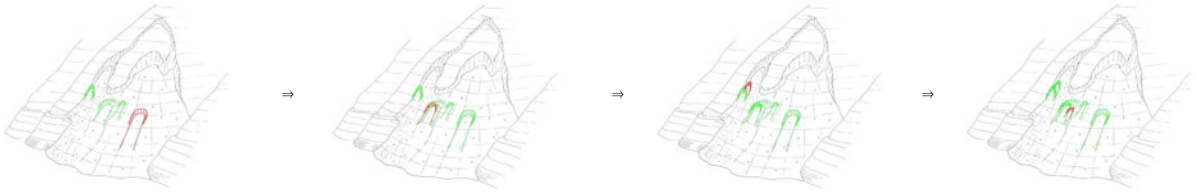
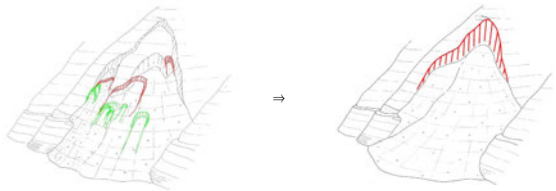
崩壊履歴	5月12日 			
VTR時刻	0:13:54	0:18:10	0:20:12	0:28:21～0:30:02
時刻	22時23分01秒	22時27分17秒	22時29分19秒	22時37分28秒～22時39分09秒
記事	22時頃より崩壊①付近にて落石が頻発する。22時23分に崩壊①の側部にて崩壊発生（崩壊の18分前）。	崩壊①の頂部付近より、数本の立木を伴い崩壊が拡大（崩壊の14分前）。	崩壊①②にて小規模な崩壊・落石が頻発し、22時29分には崩壊②の右肩部付近にて崩壊が発生（崩壊の12分前）。	上記時刻の間に、崩壊①内および頂部にて崩壊が多発し、崩壊は上方へ拡大する。崩壊②内でも引き続き小崩壊が続く（崩壊の4分前～）。
崩壊履歴				
VTR時刻	0:30:46	0:31:12	0:31:27	0:31:30
時刻	22時39分53秒	22時40分19秒	22時40分34秒	22時40分37秒
記事	崩壊②の左肩部にてやや大きな崩壊が発生。同箇所からの崩落が頻発する（崩壊の1分前）。	崩壊②の上流側一帯を巻き込んで、法枠工ごとおおきく崩落する（崩壊の33秒前）。	崩壊②の右肩付近より小崩壊発生。この頃より地山全体の変形が顕著になる（崩壊の18秒前）。	映像奥の上流側斜面にて、立木の倒壊・崩落が確認できる。崩壊のサイドクラックが形成されつつあるものと推察される。
崩壊履歴				
VTR時刻	0:31:32	0:31:42	0:31:45	0:31:52
時刻	22時40分39秒	22時40分49秒	22時40分52秒	22:40:59
記事	崩壊①の左頂部付近（崩壊の下流側サイドクラックに相当）にてやや大きい崩壊が発生（崩壊の13秒前）。	崩壊①の左頂部や周辺の至るところで崩壊が発生（崩壊の3秒前）。	地山が明瞭に動き始め、崩壊①と②の間付近より崩壊開始。	崩壊発生。崩壊①の形は残存する。 もと道路の箇所では崩積土が被っているだけの状態であり、崩壊は斜面基部には及んでいない。

表 2.3　崩壊⑥に至るまでの状況変化 [1)]

崩壊履歴	5 月 13 日 			
VTR時刻		1:29:44	1:31:28	1:31:55
時刻		7時39分51秒	7時40分35秒	7時41分02秒
記事	崩壊⑤の発生後、夜明けを迎えた時点で、斜面の両サイドに滑落崖が形成された状態にある。	崩壊斜面の中腹にて、小規模な崩壊が発生（崩壊の20分前）。	崩壊④の上部付近よりやや大きい崩壊の発生（崩壊の19分前）。	側部滑落崖が形成されている思われる箇所より、小規模な崩壊発生（崩壊の18分前）立木の崩落より推定。
崩壊履歴				
VTR時刻	1:43:34	1:44:25	1:49:08	1:50:18
時刻	7時52分41秒	7時53分32秒	7時58分15秒	7時59分25秒
記事	崩壊斜面の中央付近にて、やや大きい崩壊が発生。 崩壊斜面内や頭部付近から小規模の落石・崩壊が頻発するようになる（崩壊の7分前）。	7時40分の崩壊箇所より、再び崩壊が発生（崩壊の6分前）。	側部滑落崖に相当する付近にて、立木の崩落（崩壊の1分30秒前）。	同左付近の落ち残りの土塊が崩落。 地山全体が徐々に動き始め、次第に加速度を増す（崩壊の20秒前）。
崩壊履歴				
VTR時刻	1:50:32	1:50:38		
時刻	7時59分39秒	7時59分45秒		
記事	崩壊斜面の中央部が滑動し始め、上流側側部滑落崖付近にて崩壊、さらに下流側滑落崖（崩壊①）付近でも崩壊が発生し、斜面全体が動き出す（6秒前）。	左図の直後、斜面中腹部が頭部から押しつぶされるように変動し、斜面全体の滑動・大崩落に至る。		

② 発生頻度

大規模な崩壊の前兆現象あるいは崩壊に伴う現象（以下「前兆現象等」）として、発生した落石・崩壊・倒木の発生頻度（回数）が計測されている。落石・崩壊・倒木の定義は以下の通りである。

・落石：落石、もしくは地形変化が映像上で確認できない規模の土砂崩壊で、発生源および発生時間が（ほぼ）同一と認識される場合には、これを「1 回の落石」と計測した。
・崩壊：映像上で、発生前後の地形変化が確認できる（崩壊跡が確認できる）規模の土砂
崩壊倒木：倒木もしくは立木の倒壊を含む崩壊

＊計測は技術者による映像の目視によるものであり、特に現象の頻発する大規模崩壊前後においては、誤差を含む。

今回計測した前兆現象等の総数は 1,453 回であり、その大半（1,352 回：93%）を落石が占める。

崩壊・倒木の発生傾向も、落石とほぼ同様ではあるが、同じ範囲で繰り返して崩壊が発生した場合、初期の植生で地表が視認できない段階は「倒木」として、植生を含む表層が滑落した後は「崩壊」として扱った。崩壊⑥付近で崩壊の累積発生回数が急激に増加するのは、立木が存在する斜面表層が既に崩落した範囲でも崩壊が発生していることに起因している。

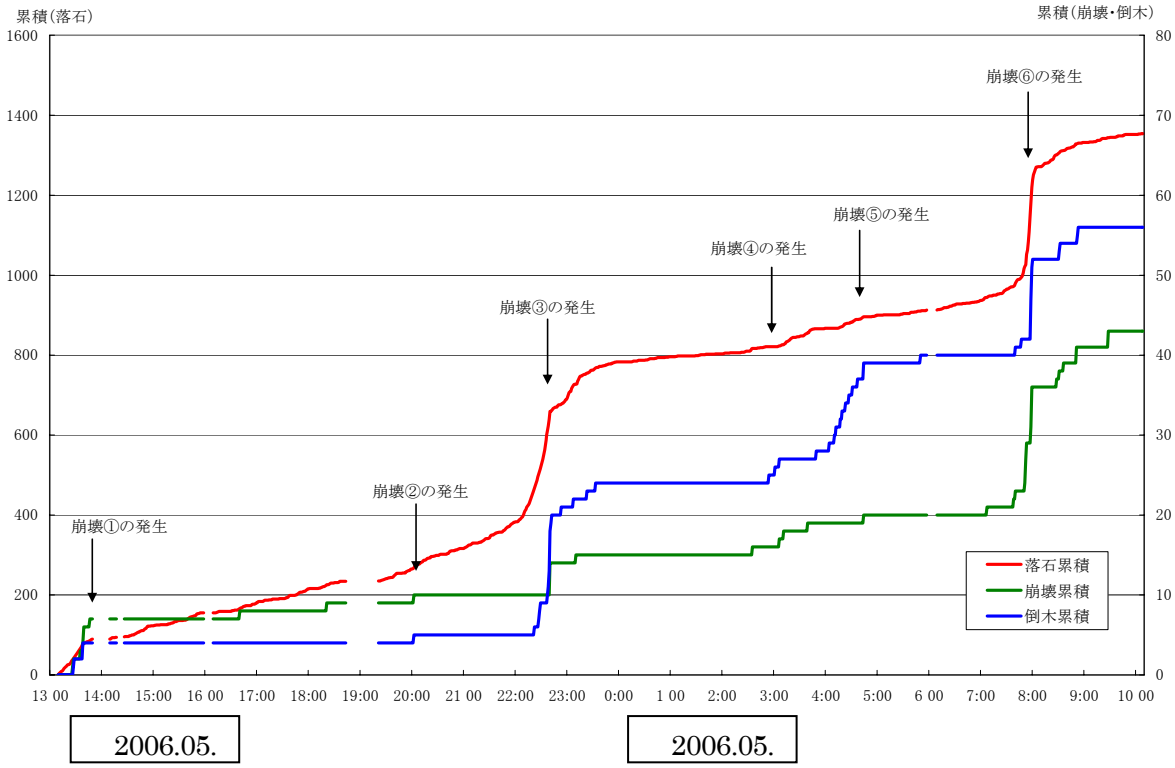


図 2.4　落石・崩壊・倒木ごとの累積頻度 [1)]

2.1.3　B地区（岩盤崩壊）

(1) 岩盤崩壊の概要

① 位置及び概況

B地区は、トンネル南側坑口で、1997年8月25日午後、山側の岩盤が長さ約80m、幅約30m、厚さ約10mの規模で崩壊した（一次崩壊）。崩壊した土砂は約2.0万m3と推定されている。この大規模な崩壊発生後、8月28日に二次崩壊が発生したが（約1.4万m3）、崩壊発生に至るまで監視員による目視の落石頻度観測が実施されている。

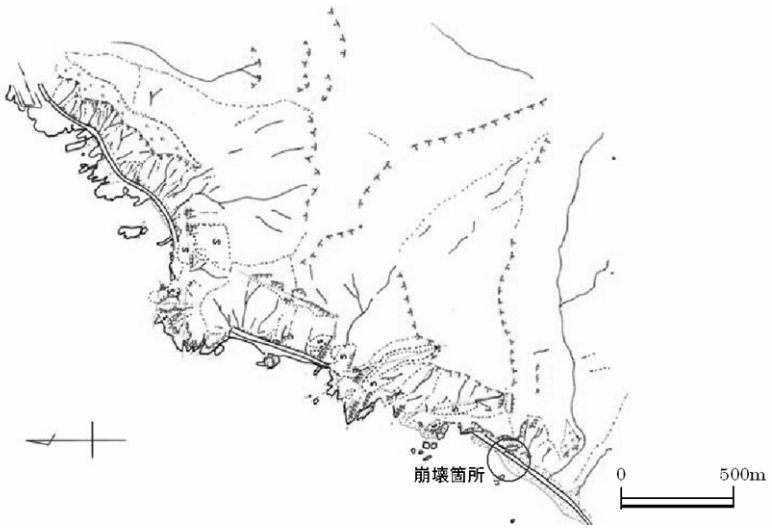


図 2.5　崩壊発生箇所位置図[3)]

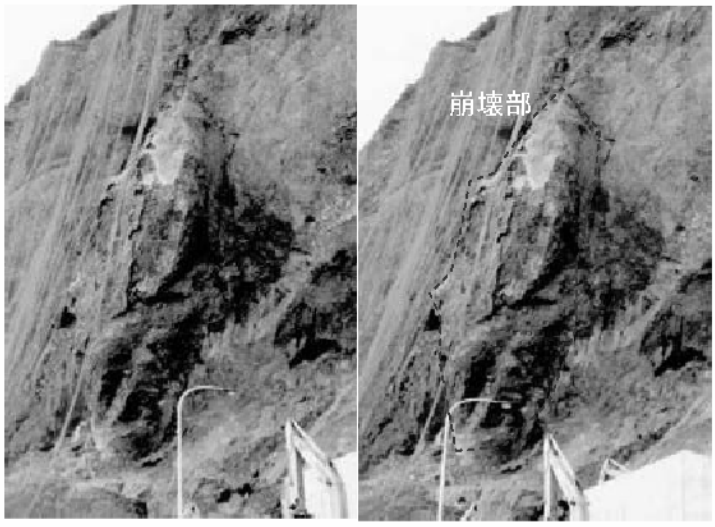


写真 2.3　B地区崩壊全景[3)]

岩盤周辺では落石が発生し危険であったため目視による観測を行っている。観測は、斜面基部より 150m 離れた地点から 4 名程度でおこなった。観測期間中は概ね晴天が続き、夜間は大型照明車 3 台が壁面を照らしていたため、視程障害は少ない状況であった。

調査項目は、落石の発生位置、亀裂の進展、湧水の変化である。

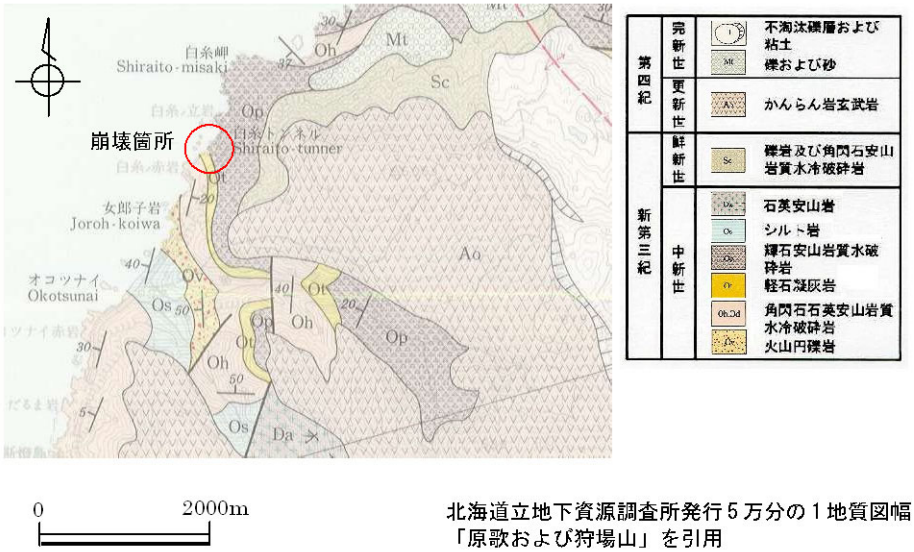
② 地形・地質

1）地形

この付近は海岸沿いに高さ 80～100m の急崖（海食崖）が連続しており、斜面下部の軟らかいシルト岩が浸食され、その上部の比較的固結度の良いシルト岩と火山円礫岩がオーバーハング状になり、極めて不安定な状態となっていたものと推定される。

2）地質

崩落した斜面を形成している地質は，新第三紀中新世後期のオコツナイ層で下位から礫岩・凝灰岩層、角閃石安山岩質ハイアロクラスタイト、砂岩・礫岩層の３層に分けられる。全体としては海側に緩く傾いた流れ盤構造である。



北海道立地下資源調査所発行５万分の１地質図幅「原歌および狩場山」を引用

図 2.6　崩壊箇所の地質図[3)]

3）規模

Ｂ地区の崩壊規模を以下に示す。比高差 135m のほぼ垂直の斜面内で発生し、規模は比高差 80m、長さ(水平方向)20m、幅 30m と推測されている。

表 2.4　崩壊規模一覧表

傾斜角（°）	90
比高差(m)	80
長さ(m)	20
幅(m)	30

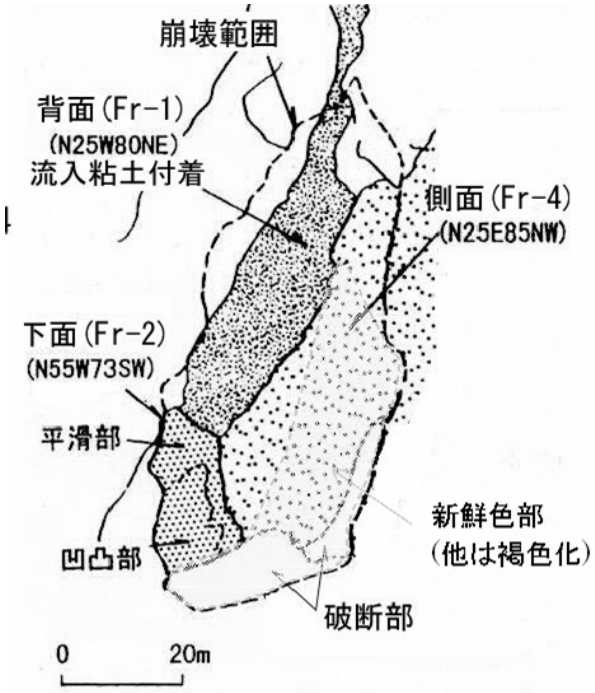


図 2.7　崩壊部分スケッチ[3)]

(2) 落石の特徴

①発生位置

落石の多くは、図 2.8 に示す岩盤周辺の特定のエリア内で発生している。各エリアの落石発生誘因は形状から次のように考えられる。

エリア①、②、⑤ ： 分離面の発生、開口、進展による剥離

エリア③、④ ： 分離面の開口や閉塞による狭在岩片の抜け落ち

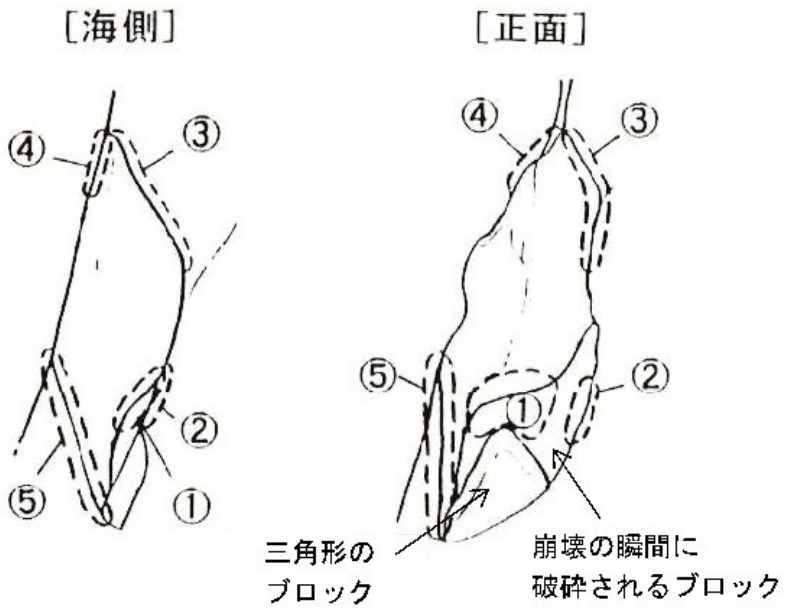


図 2.8 崩壊発生位置 [3)]

②発生頻度

観測を実施した 54 時間で 71 回の落石を確認した。落石の発生状態には大きく分けて 3 回の集中期があり、落石・小崩壊の累積回数グラフは階段状の形態を示す。1 回目の集中期は 8 月 26 日　12 時～18 時にかけてであり、10 回（全体の 14%）の落石が集中して発生している。2 回目の集中期は 8/27　16 時～22 時では 8 回の落石（全体の 11%）が集中して発生している。最後の集中期は、8/28　6 時以降であり、45 回の落石（全体の 63%）が集中して発生している。

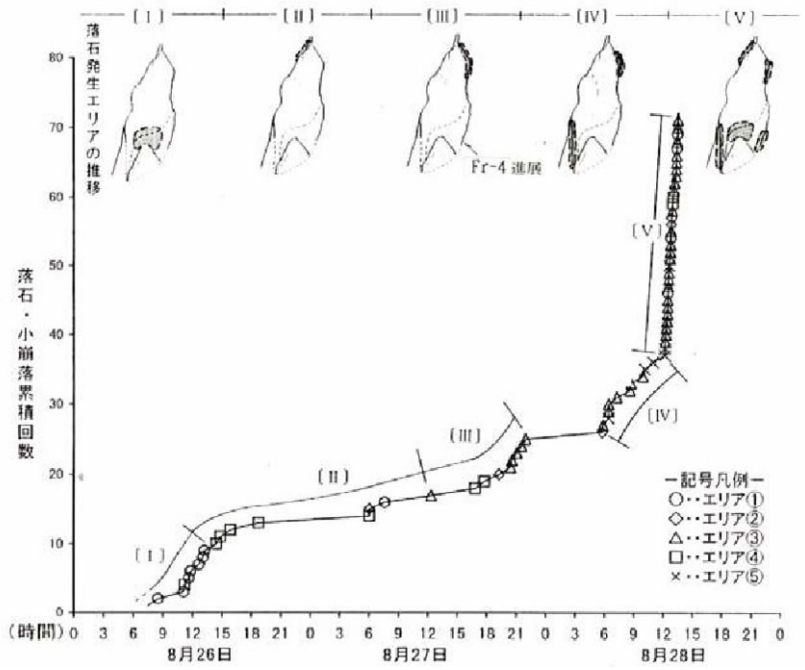


図 2.9　崩壊発生エリアの推移と落石・小崩壊の累積回数 [3)]

2.1.4　C地区（注水試験による崩落）

(1) 崩壊の概要

① 位置及び概況

C地区は、F県、一級河川・A川水系に建設されたダムの湛水域上流に位置する。変動の認められる緩み岩盤斜面において人為的な注水による崩壊を発生させ、崩壊過程をビデオカメラ等により観測した。

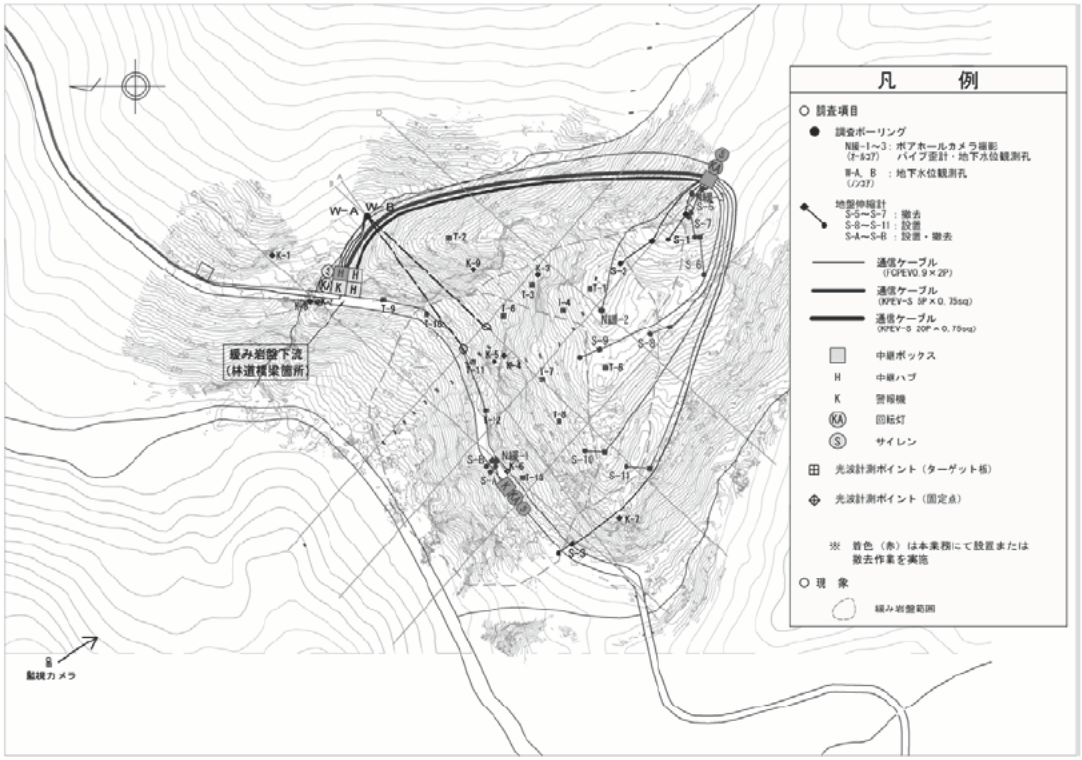
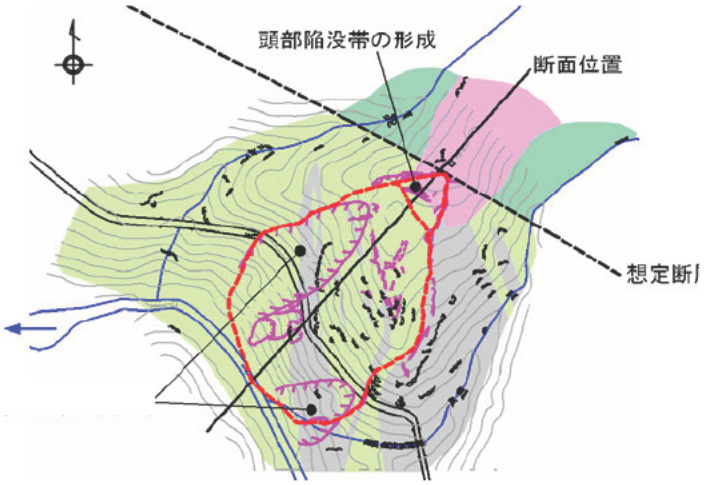


図 2.10　崩壊発生箇所位置図

② 地形・地質

C地区の緩み岩盤はダム湛水域に位置しており、斜面の傾斜角は35°であった。緩み岩盤全体は両側を沢に区切られた尾根地形先端部に位置する。注水試験では、緩み岩盤西側側部に堆積した崩積土の部分で崩壊が発生した。

周辺の基盤は無斑晶質安山岩、粗粒玄武岩、流紋岩で構成されており、頭部には断層が認められる。緩み岩盤の大部分は変質した無斑晶質安山岩であり、ボーリングコアは硬質な棒状である。強変質部分は白色に粘土化している。崩壊地には粗粒玄武岩も認められるが、強変質部分は黒色粘土化している。



○地質区分

時代			地層名	岩種	地質状況
新生代	第四紀	更新世	―	崩積土類	表層土も含めた二次堆積物。ボーリングコアは礫混じり粘土を主体とする。色調は褐色を呈する。
	新第三紀	中新世後期	貫入岩	流紋岩	変質により組織が不明瞭となっている流紋岩。ボーリングコアは、棒状～岩片状を主体とし、やや風化が進行している。色調は青灰～灰白色を呈する。
				粗粒玄武岩	斜長石の斑晶が認められる斑晶質な玄武岩。ボーリングコアは、硬質な棒状コアを主体とする。強変質部は黒色粘土化している。部分的に無斑晶質安山岩を角礫状に含む。色調は主に暗灰色を呈する。
			梨平層	火山礫凝灰岩	φ3cm以下の火山礫を含む凝灰岩。ボーリングコアは棒状を主体とするが、軟質である。色調は主に青灰～灰白色を呈する。
		中新世前期	雪山層	角礫凝灰岩	石英、斜長石、火山ガラスの礫を含む凝灰岩。部分的に無斑晶安山岩の角礫を混入する。ボーリングコアは棒状コアを主体とする。Θ=40～60°程度の堆積構造が認められる。色調は主に灰白色を呈する。
				無斑晶質安山岩	変質により斑晶が不明瞭となっている安山岩(プロピライト)。ボーリングコアは硬質な棒状コアを主体とする。強変質部は白色粘土化している。部分的に粗粒玄武岩を脈状に挟む。色調は主に緑灰色を呈する。

図 2.11　地すべり発生地周辺の地質図

③ 規模

C地区緩み岩盤の規模を以下に示す。中央部における幅 95m、主測線方向の長さが 130m、末端部と滑落部の比高差が 90m であった。長さと比高差から求められる傾斜角は 35° であった。

このうち注水実験時の崩壊発生範囲は、幅 40m、長さ 80m、比高差 60mで、傾斜は 37° であった。

表 2.5　崩壊規模一覧表

	崩壊部	緩み岩盤
傾斜角（°）	37	35
比高差(m)	60	90
長さ(m)	80	130
幅(m)	40	95

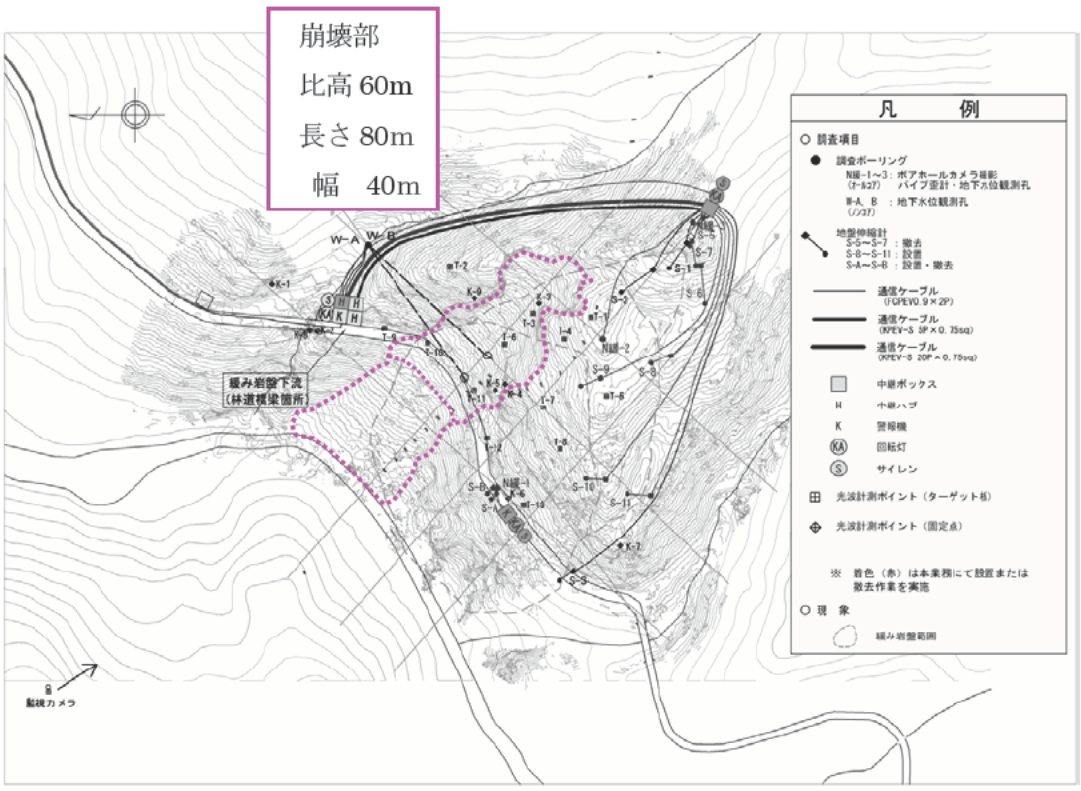


図 2.12　規模計測位置図

(2) 落石の特徴

① 発生位置

下図は崩壊の様子を撮影したビデオから解析した落石、崩壊地、湧水（斜面頂部からの注水による）の分布を示したものである。落石・崩壊は、崩壊範囲の下部で小規模なものが先行して発生し、中央部の主要部が崩落した後、形成された滑落崖が側方から上部に拡大する経過をたどった。

なお、崩壊発生時は林道の下方約 10mが湛水面であり、崩落時の落石や土砂の到達範囲はこの時点で把握されていない。

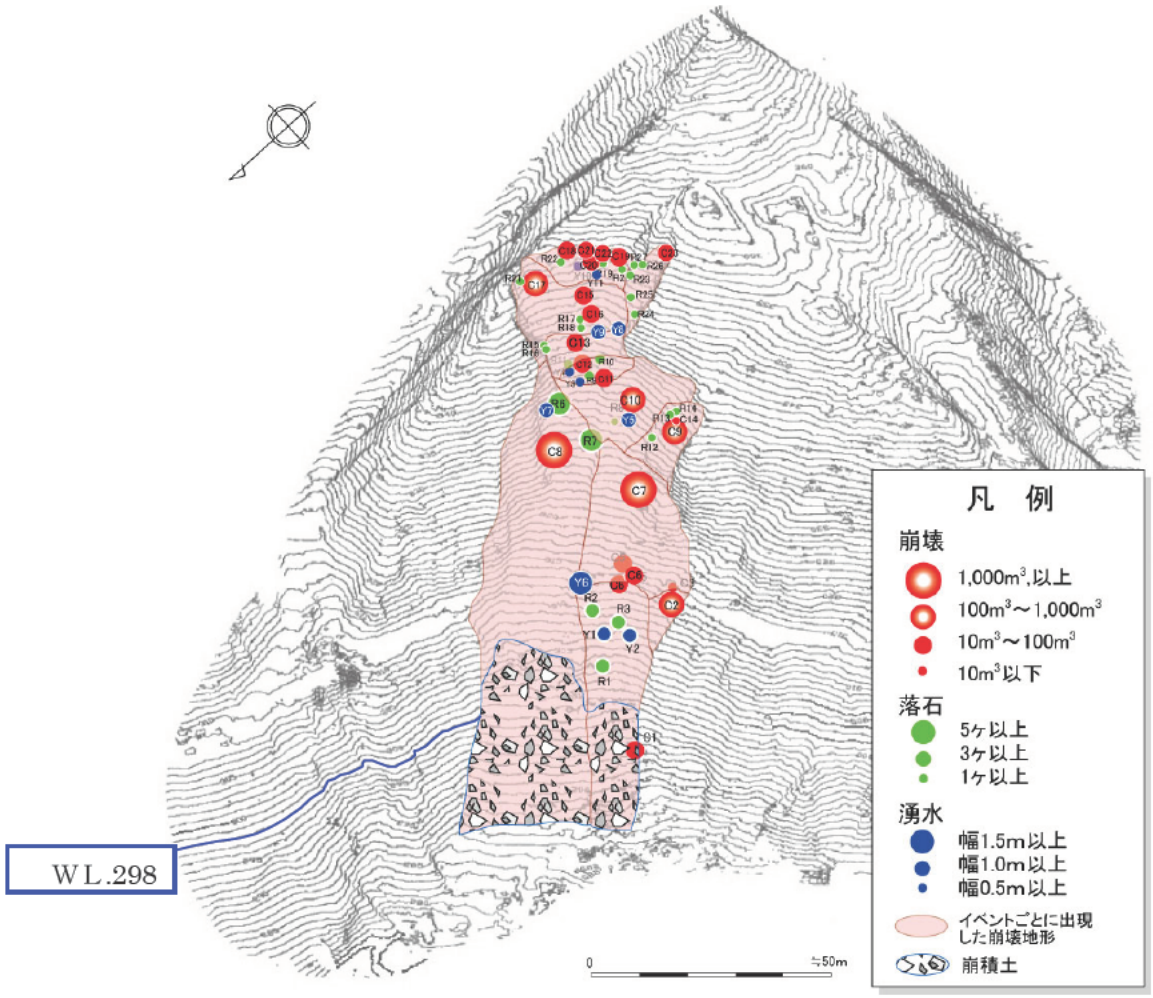


図 2.13　斜面崩壊箇所平面図

② 発生頻度

1 月 31 日　13：20 の注水試験開始後、落石・崩壊は大きく分けて 2 回にわたり集中的に発生している。1 回目はイベント 1 が発生した 1 月 31 日　16:00-17:00 であり、1 時間で 13 回（全体の 8%）の落石が確認されている。2 回目はイベント 3-8 間で発生しており、1 時間で 24 回（44%）の落石が集中した。

量的には主要部の崩落に相当するＣ6～Ｃ13 で総土量の 9 割以上が崩落している。

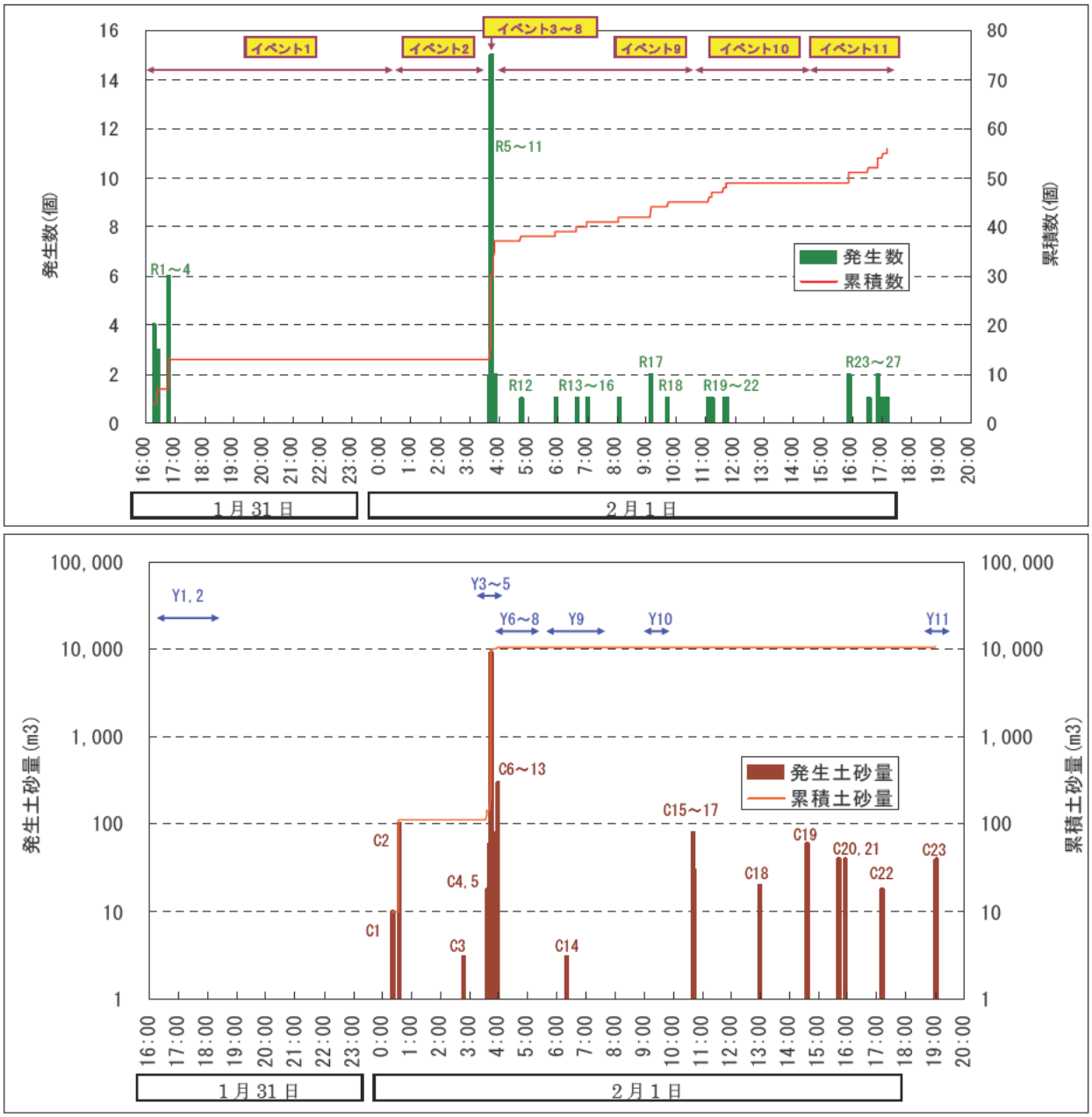


図 2.14　落石発生数・土砂量と累積値

2.1.5　落石・崩壊の発生傾向分析

(1) 概況

検知センサーに必要な条件を整理するため、大規模変動の前兆現象等と捉えられる落石・小崩壊の発生傾向を分析した３事例について、落石・崩壊発生の時間、頻度、発生場などの特徴を整理した。比較した３事例の諸元を表 2.6 に示す。

比較した３事例の崩壊のタイプは、Ｂ地区が岩盤崩壊、Ａ地区は風化岩地すべり、Ｃ地区は緩み岩盤側部に堆積した崩積土の崩壊である。それぞれ前兆現象等が確認されている。誘因についてはＢ地区では先行して発生した隣接斜面の岩盤崩壊による地形変化等、Ａ地区は融雪、Ｃ地区は人為的要因（注水による実験）であった。

表 2.6　地すべり・崩壊の前兆としての落石・小崩壊を捉えた事例の特徴

項　目		A地区	B地区	C地区
崩壊のタイプ		風化岩すべり	岩盤崩壊	崩積土の崩壊*
前兆・随伴現象の有無		有り	有り	有り
誘因		融雪	不明	人為
小崩壊および落石	小崩壊・落石発生位置	移動体周縁+表層	移動体周縁+表面	末端⇒上方
	落石崩壊回数	累計1352回	累計70回	累計55回
	移動体幅(m)	150	30	40
	移動体奥行(m)	135	20	80
	崩落部体積(m^3)	54,000	14,000	14,000
	単位幅あたり回数(回/10m)	90.3	23.3	13.8
	単位幅あたり体積(m^3/10m)	36.0	46.7	35.0
地形	傾斜角(度)	45	90	37
	比高差(m)	135	80	60
構成地質		堆積岩	火砕岩	崩積土(安山岩)
発生時期		2006/5/13	1997/8/27	2005/2/1
				*本体は岩盤すべり

落石・小崩壊の発生位置は、いずれの事例でも基本的に移動体の周縁部が主となるが、移動体の性質と規模に対応して傾向が異なる。すなわち、概ね以下のとおりである。

① Ｂ地区

急勾配斜面を形成する岩盤の移動・変形

⇒　移動・変形の過程で応力の集中もしくは大きな変位の発生が相対的に狭い範囲に集中

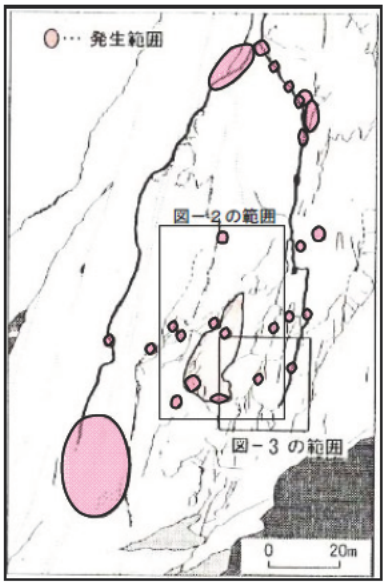


図 2.15　落石・小崩壊の発生位置[3]に加筆

（Ｂ地区）

② Ａ地区

風化の進行した移動体のすべり

⇒　表層に形成された厚い風化層のために、移動体周縁では小崩壊が多発するとともに、風化層から多量の落石が発生

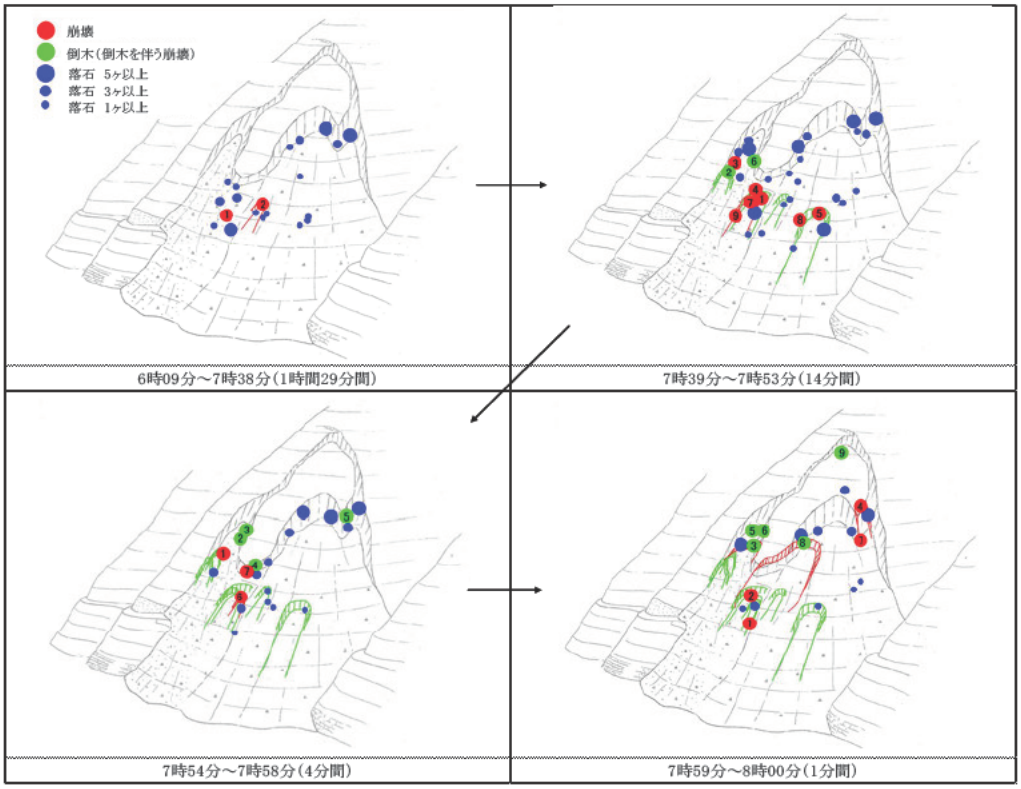


図 2.16　落石・小崩壊の発生位置[1]（Ａ地区地すべり）

③ Ｃ地区

緩み岩盤の周縁に堆積した崩積土部分に大量の注水

⇒　末端崩壊の発生後は移動体が下方から順次崩落

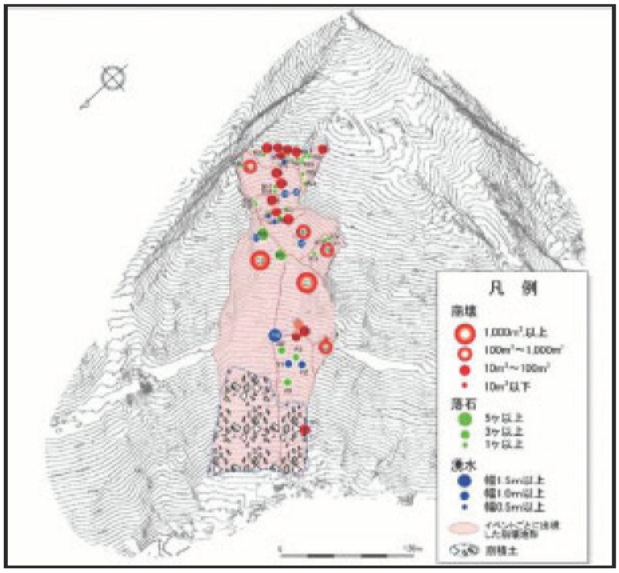


図 2.17　落石・小崩壊の発生位置（Ｃ地区）[4]

④ まとめ

落石・崩壊の頻度（回数）は、A地区の 1352 回が最も多く、B地区 70 回、C地区 55 回であった。

崩壊前の地形はいずれも 30° 以上の急斜面を呈し、B地区ではほぼ垂直。移動範囲頭部と末端部の概略の比高差は、A地区で 135m、B地区で 80m、C地区で 60m であった。

(2) 時間と頻度

① 各事例における落石頻度の傾向

図 2.18 は各事例における落石･小崩壊の頻度の累積状況と経過時間を示したグラフである。左側は 3 事例を比較したグラフ、右側のグラフはA地区の頻度が他の事例よりも極端に大きく傾向が読み取りにくいため、C地区とB地区の事例をとりだして頻度のレンジを拡大したグラフである。

落石の頻度（回数）はA地区地すべりが 1352 回と最も多い（左図）。いずれの事例においても落石の頻度はいくつかの集中期（落石・崩壊回数が急増する期間）を経て階段状に累積していく傾向が認められる。

一方、崩壊までの経過時間は、A地区およびC地区は監視開始後 30 時間弱であり、B地区は 50 時間を要した。但し、この時間は、一連の崩壊の監視を開始してからの時間であり、変状発生からの時間ではない。

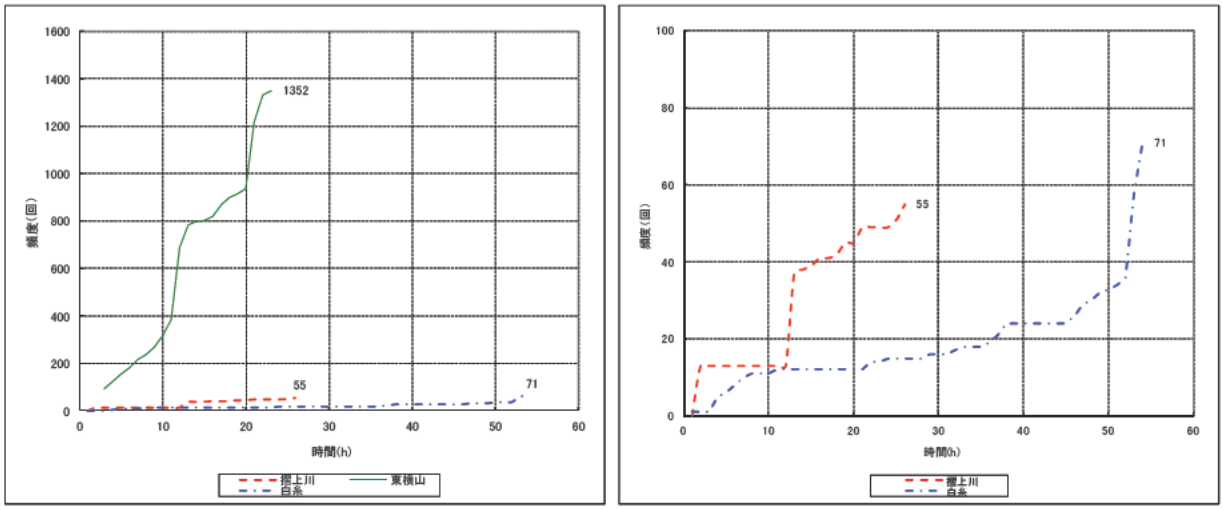


図 2.18　落石頻度の累積と経過時間

② 落石頻度の変化

図 2.19 はA地区地すべりの落石・小崩壊の頻度の累積状況と経過時間を示したグラフである。この地区では非常に多数の落石が発生しており、落石のほかに「崩壊」「倒木」も計測されている。図中の枠囲い部分に着目すると、以下の特徴が読み取れる。

・「崩壊」「倒木」が発生していない期間中でも、概ね同じ頻度で落石が発生している。

・規模の大きい崩壊発生前、この事例では 10～35 分程度前に頻度が増加している。

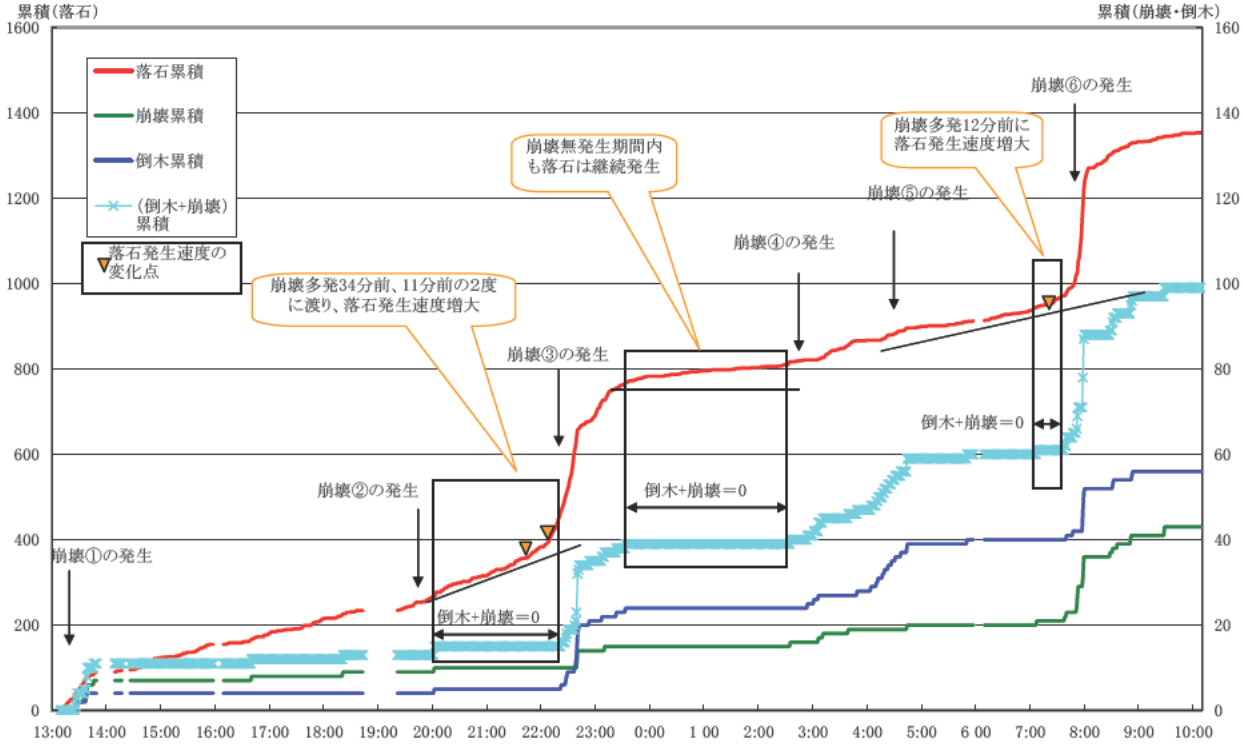


図 2.19　大規模崩壊発生前の落石頻度増加（A地区）[1] に加筆

また、B地区においても、岩盤中腹部で発生した小規模な崩落（高さ約25m、幅約10m）に際して、発生（13：14）の約10分～2時間前に、図2.20のような周辺での落石発生が確認されている。

一方C地区では、前兆的な小落石の発生後約12時間後の主要な崩壊まで、約4時間前の小崩落を除くとほとんど変動がなく、他の自然発生の２例とは傾向が異なる。

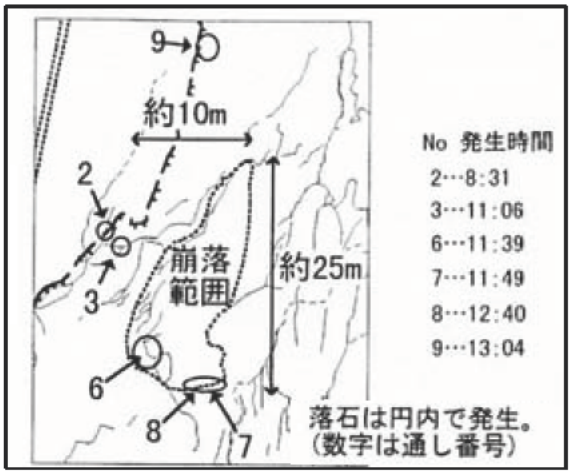


図 2.20　崩落に先立って発生した落石（B地区）[3]

③ 加積百分率による累積傾向

A地区の落石頻度は 1352 回と最小頻度のC地区（55 回）の 24.8 倍であった。極端に総数が異なるため、各事例で確認された全落石頻度を 100 とした場合の加積百分率により、各事例の落石累積傾向を比較した。

その結果、計測開始後の落石回数累加曲線では、A地区とC地区の累積傾向に類似性が認められた。一方、B地区は緩やかに頻度が増加し、移動体本体崩落直前の 3 時間内で、全体の 49.3%の落石が集中して発生している。

しかし、A地区（発見 4 月 18 日）、C地区（発見前年 11 月 10 日）とも実際の変動は以前から継続しており、C地区についてはさらに人為的な不安定化作用が加えられている。このことから、両ケースともむしろ落石崩壊数の計測開始時点ですでにB地区の事例の「崩落前 3 時間」に相当する崩落直前の加速期に入っていた可能性がある。また移動体の性質の違いによって（A地区：厚い風化部を伴う風化岩地すべり、C地区：マトリックスの多い崩積土）、それ以前の落石や崩壊の発生が抑制されていた可能性もある。

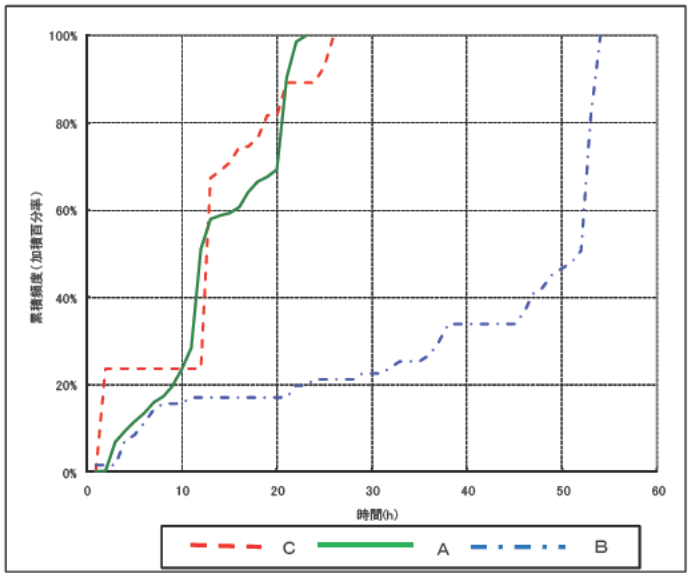


図 2.21　加積百分率による落石の累積傾向と時間の関係

(3) 落石検知による移動体本体の変動予知に向けて

本研究で目指している、検知した落石によって移動体本体の変動を予知する方法について、前出の事例から以下の評価を行った。

1) 落石・小崩落発生数の増加傾向（落石検知による崩壊予測の方向性）

・移動体本体の大規模（土量・移動距離・速度）な移動に先行あるいは伴って発生する落石や小崩壊現象は、時間とともに増加する傾向にある。

・今回の事例中Ｂ地区のような岩盤崩壊やＡ地区のような厚い風化層を伴う風化岩すべりの場合、ある程度の規模の崩壊に約 10 分～2 時間先立って落石の発生頻度（単位時間内）が増加することが確認された。特にＡ地区では落石数が多く、頻度増加が連続的に把握できたため、その後の崩壊予測には有効な情報となりうることが確認された。

2) 落石検知による崩壊予測の課題

事例検討の結果からは、今後の検討に関する以下の課題が抽出された（図 2.22)。

●課題①　落石・小崩落の数量・規模と発生位置

・本研究では仮設防護柵へのセンサー設置による落石検知を目指しているため、予測段階で頻度の変化が把握できる数量の前兆現象等が必要である。事例の落石・小崩落の回数は、少ない順に 55、70、1354 と 20 倍以上の差があり、実際の検知上は課題になる可能性がある。また、防護柵で検知される落石の衝撃力は、想定される落石・崩壊の単位規模と発生位置双方に規制されるため、同程度の振幅が観測された落石についても、発生位置や規模が大きく異なる可能性があることに注意する必要がある（Ｂ地区の場合、発生位置の比高差が約 80 m)。現場では、既往の落石規模や岩盤の節理・亀裂間隔、あるいは斜面に残る崩壊跡の位置や規模等から想定する方法がある。

●課題②　移動体本体の変動機構

・Ｃ地区のケース（崩積土の崩壊）では、先行する落石の増加傾向が不明瞭なまま移動体主要部の崩壊がはじまっており、崩壊予測に困難を伴うケースである。ただし、これは人為的な注水という不安定化作用が付加されており、崩積土のすべりや崩壊に共通する特性かどうかは現時点で不明である。

・このほか、岩盤の崩壊に関しても、移動体の形状や崩壊機構（例えばトップリングとスライド）によっては、落石や小崩落の発生状況が異なる可能性があり、注意を要する。

●課題③　落石・崩落土砂の落下経路と防護柵の位置及び範囲

・①に関連して、斜面と防護柵との位置関係も考慮する必要がある。例えば斜面末端から防護柵設置位置までの距離・傾斜・表層の状態（露岩・堆積物）によって、斜面上で発生した同一の落石についても柵への衝突エネルギーが大きく異なる。これらは正確な検知の障害になるほか、柵の破損につながるケースもあり、注意を要する。

・落石や崩壊の発生源を概ね特定したうえで、落下経路を考慮した範囲に防護柵が設置されている必要がある。

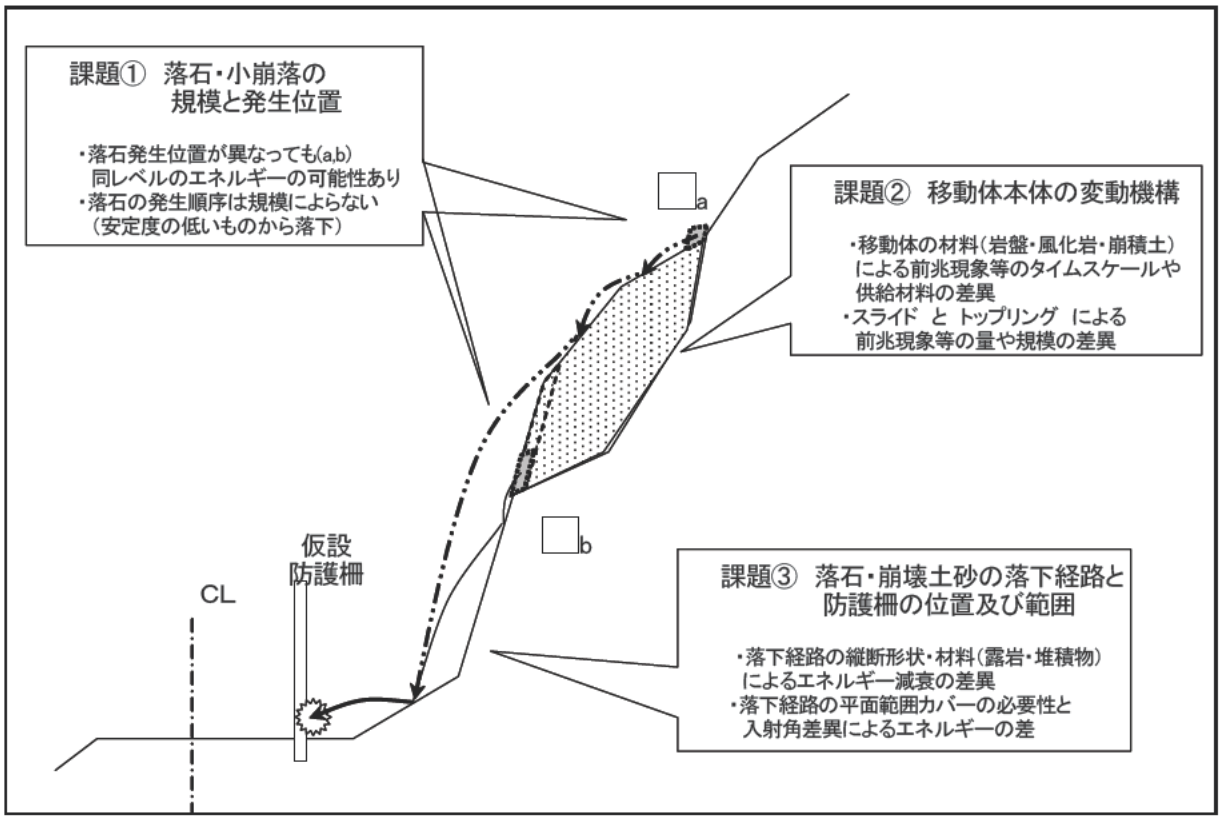


図　2.22　事例検討結果から抽出された検討課題

2.1.6 斜面崩落の前兆現象としての落石

2.1.3 項では落石・小崩落を大規模崩落の前兆現象として着目し、事前の落石・小崩落の頻度を測定した事例であった。その他の事例として記載された文献の記述を抜粋して以下に記す。

〔山口県鳴滝地区〕[4)]

・崖高 60m の花崗岩採石場跡地で、幅 40m にわたり崩壊高さ 35m、崩壊土量約 3,300m^{3}の岩盤崩落が発生した。この 6 日前に小崩落があり、住民が犬の散歩時に崩落音を聞き通報がなされた。調査の結果、長径 0.7m 程度の落石があったことを確認した。また、崩落 5 日前と 3 日前の写真を比較した結果、崩落前後の 2 時期の間に、長径 1.0m 程度の 2 個の落石が発生していたことが確認できる。さらに大崩落の前日には測量技術者が岩盤の「きしむ音」を聞いて異常を感じ、現場から避難していた。

〔奈良県大塔村国道 168 号〕[5)]

・8 月 10 日通行止め区域内の車両・人を退去させるためのパトロール中、午前 0 時 10 分に末端部 2 箇所で小規模な崩壊が発生し、0 時 15 分に延長約 120m、高さ約 120m、崩落土量約 20 万 m^{3}の本格的な地すべりが生じた。

〔徳島県三好市平上地区〕[6)]

・斜面崩壊の約 4 ヶ月前の平成 10 年 7 月に住民より斜面崩落があると連絡があり、現地調査を実施した。当地区は約 40 年前から崩落地の頭部付近に亀裂が発生しており、過去に幾度も落石を繰り返した箇所である。

・11 月 5 日には直下の県道に直径 30cm 程度の落石が確認され、翌 6 日には県道の全面通行止めを開始するとともに周辺住民も安全な場所への避難を実施している。そして、11 月 7 日の午前 2 時頃、大音響とともに崩壊が始まり、民家を破壊するなど、午前 11 時まで崩壊が連続した。

斜面崩落や岩盤崩落の前兆現象に関して記載のある文献は多くはないが、前記した事例からは、斜面崩落や岩盤崩落の前には落石や小崩落が発生する場合が多いと判断でき、落石・小崩落を斜面崩落等の前兆現象として捉えることは、その後発生する可能性のある大規模な斜面崩落や岩盤崩落に起因する仮設防護柵設置区間の道路利用者が受ける被災を未然に防止する上で有効であると考える。

2.2　仮設防護柵の設置事例

2.2.1　仮設防護柵設置に関する基準書

(1) 標準タイプ

標準的な仕様を明記した資料はないので、全国地すべりがけ崩れ対策協議会が各都道府県に対して実施した「急傾斜地崩壊防止工事における仮設防護柵についてのアンケート」の集計結果を参考に提案された 12 種類の標準タイプの諸元を表 2.1 に示す[7]。

支柱に H 形鋼を採用する場合（下表内⑦、⑧、⑪、⑫）は、H-150 を 2m 間隔で建込む仕様が標準とされている。

表 2.1　仮設防護柵標準タイプ 12 例の諸元

諸元＼タイプ	①	②	③	④
長 × 高（m）	10.0×1.5	10.0×3.0	10.0×3.0	10.0×4.0
主　柱（cm）	杉または松丸太 200×φ12×10本	杉または松丸太 400×φ12×5本	杉または松丸太 400×φ12×5本	単　管 450×φ4.86×5本
横　梁（cm）	〃 400×φ9×5本	〃 400×φ12×5本	〃 400×φ12×5本	〃 400×φ4,86×5本
控　木（cm）	〃 200×φ12×5本	〃 200×φ12×5本	〃 200×φ12×5本	〃 300×φ4.86×5本
控　杭（cm）	〃 100×φ12×5本	〃 150×φ12×5本	〃 150×φ12×5本	—
筋　違（cm）	—	—	〃 260×φ12×20本	単　管 300×φ4.86×20本
土留板（cm）	厚　板 200×20×3.6×35枚	厚　板 200×20×3.6×80枚	—	—
防　護　網	—	—	網目40×8#×30.0㎡	網目40×8#×40.0㎡
諸元＼タイプ	⑤	⑥	⑦	⑧
長 × 高（m）	10.0×4.0	10.0×4.0	10.0×4.0	10.0×4.0
主　柱（cm）	杉または松丸太 500×φ12×5本	杉または松丸太 500×φ12×5本	H　形　鋼 450×15×15×0.7×5本	H　形　鋼 450×15×15×0.7×5本
横　梁（cm）	〃 400×φ12×5本	〃 400×φ12×5本	L　形　鋼 400×0.6×7.5×7.5×10本	L　形　鋼 400×0.6×7.5×7.5×10本
控　木（cm）	〃 280×φ12×5本	〃 280×φ12×5本	—	—
控　杭（cm）	〃 150×φ12×5本	〃 150×φ12×5本	—	—
筋　違（cm）	—	〃 290×φ12×20本	—	—
土留板（cm）	厚　板 200×20×3.6×100枚	—	厚　板 200×20×3.6×100枚	—
防　護　網	—	網目40×8#×40.0㎡	—	網目40×8#×40.0㎡
諸元＼タイプ	⑨	⑩	⑪	⑫
長 × 高（m）	10.0×5.0	10.0×5.0	10.0×5.0	10.0×5.0
主　柱（cm）	杉または松丸太 600×φ12×5本	杉または松丸太 600×φ12×5本	H　形　鋼 580×15×15×0.7×5本	H　形　鋼 580×15×15×0.7×5本
横　梁（cm）	〃 400×φ12×10本	〃 400×φ12×10本	L　形　鋼 400×0.6×7.5×7.5×12.5本	L　形　鋼 400×0.6×7.5×7.5×12.5本
控　木（cm）	〃 400×φ12×5本	〃 400×φ12×5本	—	—
控　杭（cm）	〃 150×φ12×5本	〃 150×φ12×5本	—	—
筋　違（cm）	—	〃 290×φ12×30本	—	—
土留板（cm）	厚　板 200×20×3.6×100枚	—	厚　板 200×20×36×125枚	—
防　護　網	—	網目40×8#×50.0㎡	—	網目40×8#×50.0㎡

「新・斜面崩壊防止工事の設計と実例（建設省河川局砂防部）」より抜粋

(2) 積算基準

「国土交通省土木工事積算基準[8]」に掲載されている「切土及び発破防護柵工」の積算基準を抜粋して以下に示す。

⑩ 切土及び発破防護柵工

1. 適 用 範 囲

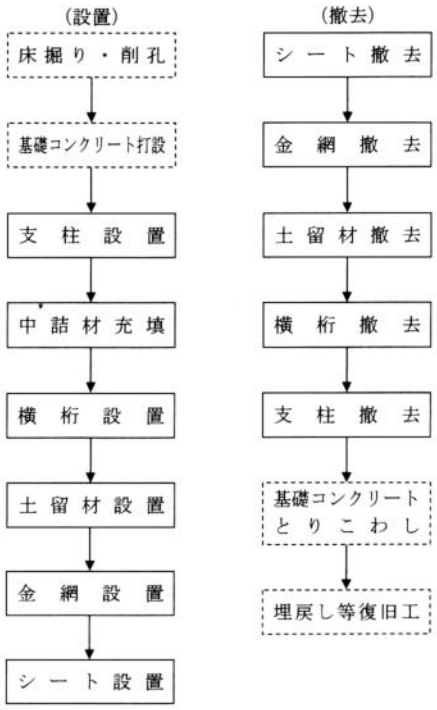
本資料は，切土及び発破による落石又は飛石を防止するための仮設防護柵の設置・撤去に適用する。

ただし，仮設防護柵の支柱はH形鋼とし，仮設防護柵の高さ（地上高）は，2.5～10m，支柱間隔1.5～4.0m及び根入れ長さは２m以下のものとする。

2. 施 工 概 要

2－1 施工フロー

施工フローは，下記を標準とする。



（注） 1. 本歩掛で対応しているのは，実線部分のみである。
2. 横桁等設置・撤去の有無にかかわらず適用出来る。

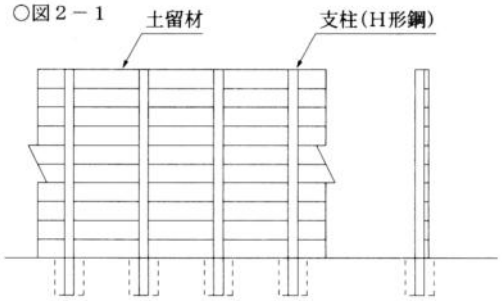
図２－１ 施工フロー図

「国土交通省土木工事積算基準（国土交通省）」より抜粋

図 2.23 積算基準(1)

２－２　参考図等

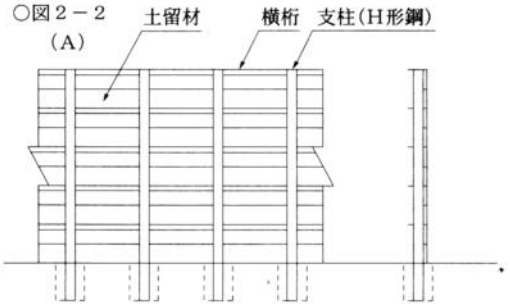
○図２－１



支柱形式	支柱	H形鋼
	横桁	無し
土留材	種類	有り
	施工内容	全面施工
金網・シート施工内容		－

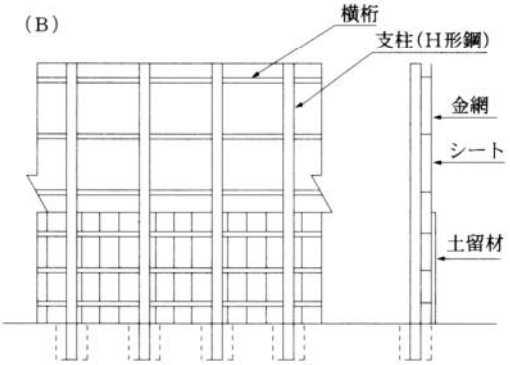
○図２－２

(A)

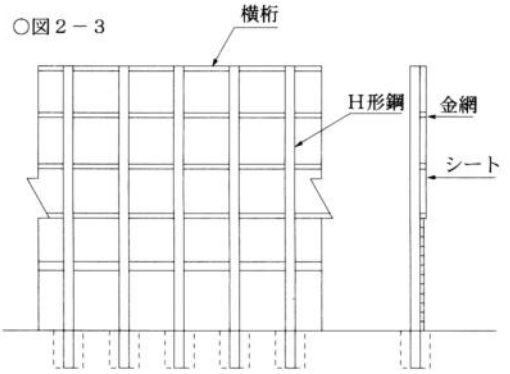


支柱形式	支柱	H形鋼
	横桁	有り
土留材	種類	有り
	施工内容	土留全面又は土留及び金網・シート併用施工
金網・シート施工内容		

(B)



○図２－３



支柱形式	支柱	H形鋼
	横桁	有り
土留材	種類	－
	施工内容	－
金網・シート施工内容		全面施工

「国土交通省土木工事積算基準（国土交通省）」より抜粋

図 2.24　積算基準(2)

3. 施 工 歩 掛

3－1 機種の選定

機械・規格は，次表を標準とする。

表3.1 機種の選定

機 械 名	規 格	単位	数量	摘 要
ラフテレーンクレーン	排出ガス対策型（第１次基準値） 油圧伸縮ジブ型 10ｔ吊	台	1	仮設材吊込用
高 所 作 業 車	トラック架装リフト・ブーム型 標準デッキタイプ 作業床高さ12m	〃	1	切土及び発破防護柵 工用仮設足場

（注） 1. ラフテレーンクレーン及び高所作業車は，賃料とする。
2. 現場条件により上表により難い場合は，別途考慮する。

3－2 日当り編成人員

切土及び発破防護柵の設置・撤去作業の日当り編成人員は，次表を標準とする。

表3.2 日当り編成人員 （人）

作業区分	世話役	とび工	溶接工	普通作業員
設 置	1	1	1	2
撤 去	1	1	1	2

3－3 日当り施工量

日当り施工量（D）は，次表を標準とする。

表3.3 日当り施工量（D） （m^2）

作業区分	設 置	撤 去
日当り施工量（D）	84	132

3－4 諸 雑 費

諸雑費は，中詰材，溶接棒，電気グラインダー研削板，アセチレンガス，酸素，番線，電気グラインダー損料，電気溶接機運転経費及び電力に関する経費等の費用であり，労務費の合計に次表の率を乗じた金額を上限として計上する。

表3.4 諸雑費率 （%）

作業区分	設 置	撤 去
諸 雑 費 率	9	13

（注） 中詰材の施工の有無及び中詰材種類は問わず適用できる。

3－5 材料使用量

金網，シートの使用量は，継重ね量を見込み，次式による。

使用量（m^2）＝設計面積（m^2）×（１＋K）……式3.1

表3.5 ロ ス 率（K）

材 料 種 別	ロ ス 率
金 網	＋0.04
シ ー ト	＋0.09

「国土交通省土木工事積算基準（国土交通省）」より抜粋

図 2.25 積算基準(3)

4. 単　価　表

（1） 切土及び発破防護柵の設置・撤去100m²当り単価表

名　称	規　格	単位	数量	摘　要
世話役		人	1×100／D	表3.2，表3.3
とび工		〃	1×100／D	〃，〃
溶接工		〃	1×100／D	〃，〃
普通作業員		〃	2×100／D	〃，〃
ラフテレーンクレーン賃料	排出ガス対策型(第1次基準値) 油圧伸縮ジブ型10ｔ吊	日	1×100／D	表3.1，〃
高所作業車運転	トラック架装リフト・ブーム型 標準デッキタイプ 作業床高さ　12m	〃	1×100／D	〃，〃
諸雑費		式	1	表3.4
計				

D：日当り施工量（m²／日）

（2） 機械運転単価表

機械名	規　格	適用単価表	摘　要
高所作業車	トラック架装リフト・ブーム型 標準デッキタイプ 作業床高さ　12m	機－28	運転労務数費→1.00 燃料消費量→　26 賃料数量→1.07

「国土交通省土木工事積算基準（国土交通省）」より抜粋

図 2.26　積算基準(4)

2.2.2　既往の設置事例調査結果

「切土及び発破防護柵工」について実施された実態調査について、「建設マネジメント技術　2000年８月号[9)]」の抜粋を下記に示す。調査結果によれば、土留め材は、鋼板・鋼矢板の全面使用及び板材・丸太の全面使用が圧倒的に多い。また、支柱はＨ形鋼が使用され、高さは4m～6m、間隔は2mの事例が多いことが分かる。

切土及び発破防護柵工

1.　はじめに

切土及び発破防護柵は，切土または発破による落石，飛石等の飛散を防止するために設置される工事用の仮設防護柵である。構造は法面の勾配，高さ，土質などにより規模，衝撃，設計荷重等が異なるため，統一した規格を決定することは困難である。

ここでは，平成10年度に実態調査を実施した「切土及び発破防護柵工」について，その概要を紹介する。

2.　調査概要

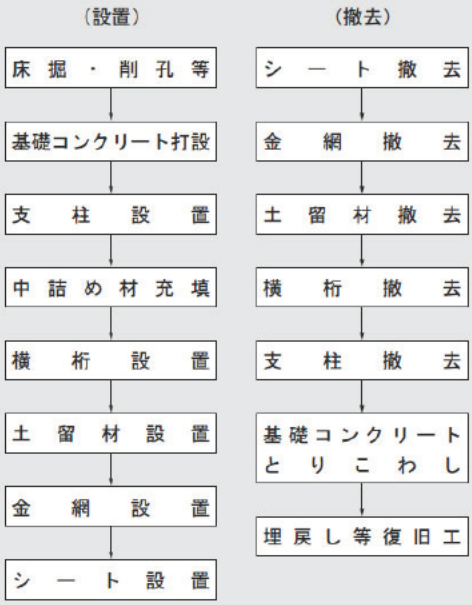
調査件数は57件（直轄工事15件，補助工事42件）であり，直轄工事よりも補助工事での施工実績が多く見られた。工事区分別では，道路工事が46件，その他が11件であった。

3.　施工形態

切土及び発破防護柵工の施工フローを**図―1**に示す。

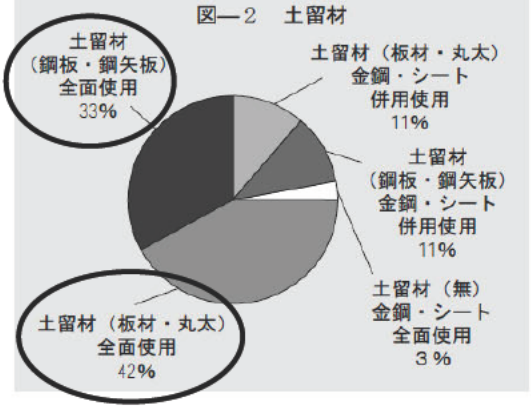
切土及び発破防護柵の構造は支柱にＨ形鋼を使用しており，土留材は**図―2**に示すようにさまざまなものがある。主なものとしては，鋼板・鋼矢板を全面使用したもの（**写真―1**），板材・丸

図―1　施工フロー



「建設マネジメント技術（財団法人　経済調査会）」より抜粋

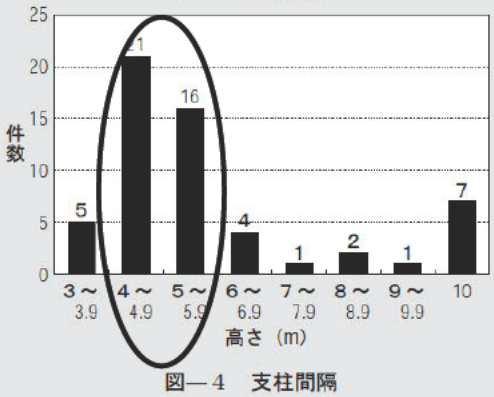
図—2　土留材



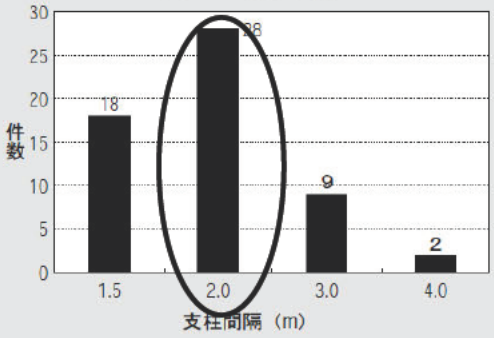
太を全面使用したもの（**写真—2**），板材を下面に使用し金網・シートを上面に併用使用しているもの（**写真—3**）があり，土留材に板材・丸太を全面使用したものが多く施工されていた。

切土及び発破防護柵の高さについては**図—3**に示すように3～10mの間で施工されており，高さ5m前後の施工が最も多く見られた。また，支柱間隔は**図—4**に示すように2mの施工が多

図—3　支柱高さ



図—4　支柱間隔



写真—1

写真—3

写真—2

写真—4

「建設マネジメント技術（財団法人　経済調査会）」より抜粋

く見られた。

仮設防護柵の設置撤去時における作業機械としてはクレーンが主に使用されており，機種はトラッククレーン油圧式4.8～4.9t 吊が最も多く，前回の調査と比べ，特に大きな変動は見られなかった。

4. 技術動向

切土及び発破防護柵工は，従来からある工法で，その構造，使用材料に大きな変化は見られなかったが，土留材の設置撤去について，鋼矢板，板材をブロックごとにまとめてクレーンにて吊込・吊降ろす等（**写真―4**）作業を効率良く行っており，今後も設置撤去作業の効率化が図られていくものと考えられる。

5. おわりに

切土及び発破防護柵工は，主に片側１車線，片側交互通行の現場で施工されており，工事現場における安全対策上の仮設構造物を施工する上で必要不可欠な工法である。今後は継続的な調査（モニタリング調査）を実施し，施工実態の動向を把握していきたい。

「建設マネジメント技術（財団法人　経済調査会）」より抜粋

図 2.27　仮設防護柵に関する実態調査結果

2.3　検知センサーの検討

2.3.1　検知対象とする現象

2.1 で示したように、斜面の大規模崩壊の前兆現象と捉えられる落石・小崩落の発生を計測対象とした事例分析の結果を踏まえると、大規模崩壊前の落石・小崩落現象の頻度増加を連続的に把握することは、その後の大規模崩壊の予測に有効であることが認められた。この結果を踏まえると、仮設防護柵が設置された斜面の大規模崩壊の危険箇所において、落石・小崩落の衝撃時の仮設防護柵の振動を測定し、落石・小崩落の頻度の増加傾向を検出することで、大規模崩壊による二次災害発生防止の可能性があるといえる。このような観点に基づき、落石・小崩落を検知対象とし、振動計を用いた崩落検知センサーおよび検出システムの開発を行うものである。

ここで、直接的な測定対象となる仮設防護柵について、構造に起因する基本的な振動特性や、落石・小崩落とそれ以外の振動源（後述するような交通振動、雷、地震など）との振動特性の違いを明らかにすることが、崩落検知センサーおよび検出システムの開発にあたり大変重要なポイントである。

2.3.2　除去すべき現象

振動センサーを野外に設置した場合、以下の例に示すような予期しない現象を検出する場合があり得る。特に、ある一定の振幅レベルを超えた振動の発生回数を検知／計数する目的の計測では、このような予期しない現象の検知はある意味で致命的な欠陥となり得るので、可能な限り除去しなければならない。

（1）雷（空電）

通常，パルス状波形あるいは、極めて高い周波数でかつ継続時間が短い波形であるという特徴がある。 継続時間を AE(Acoustic Emission)で定義されている(Count)で表現すると、多くは数カウント以下であることが多いようである。

センサーで振動現象として検知されるものではなく、ケーブルや計測器を含んだ計測システム全体のどこかに電気信号として混入する、という特徴があるため、見掛け上の振幅は、極めて大きいものから小さいものまで様々である。

数カウント以下という特徴を生かした適切なフィルター処理を施すことにより、除去することは十分可能であろう。また、アナログ的に検出されたとしてもデジタル処理の過程で除去することは可能である。

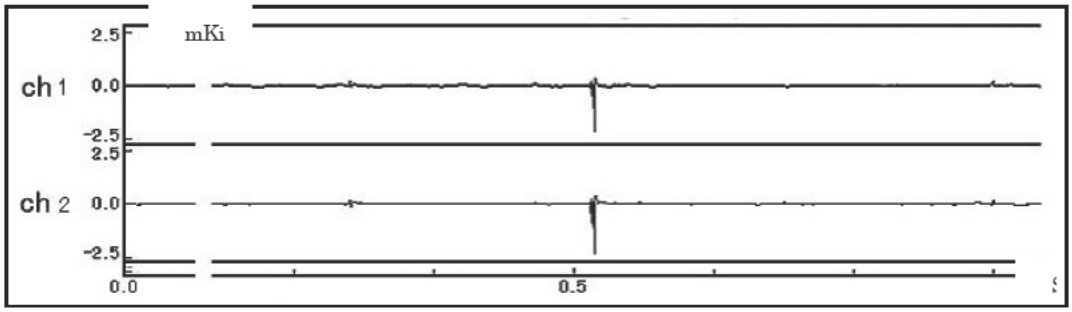


図 2.28 雷(空電)による波形例

(2) 自動車走行振動

走行する自動車の種類や重量、タイヤの性質などにより、振幅、周波数と振動継続時間は様々であるが、継続時間は１秒よりは長い傾向にある。

仮設防護柵は道路脇に設置されていることが多いので、自動車の風圧によって防護柵(矢板)が自由振動する可能性がある。

振動センサーは風圧そのものを検知しない構造にすることはもちろん、仮に走行振動を検出したとしても、振動の周波数が低い場合ではフィルターによる除去が可能であり、場合によっては、継続時間による除去も可能と考えられる。

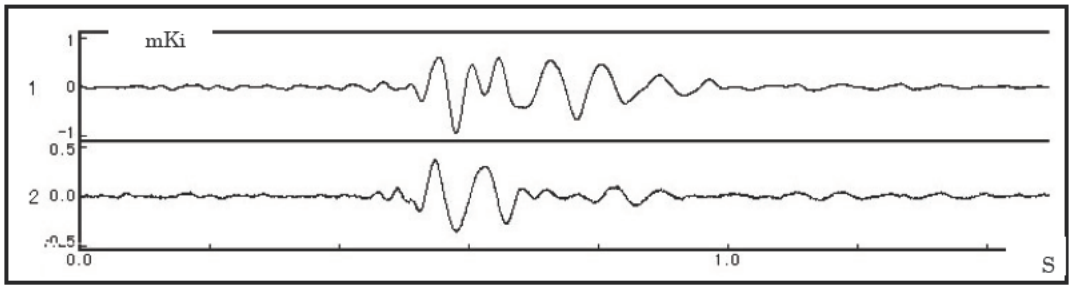


図 2.29 交通振動による波形例

(3) (微小)地震

(微小) 地震の活動度が高い場所では、比較的多くの(微小)地震を検知する可能性がある。発生する地震の規模にもよるが、振幅，周波数と振動継続時間は様々であって、一般的に継続時間は１秒より確実に長く、落石による衝撃振動よりは確実に低周波である、という特徴がある。

フィルターによる除去が可能であり、また継続時間による除去も考えられる。

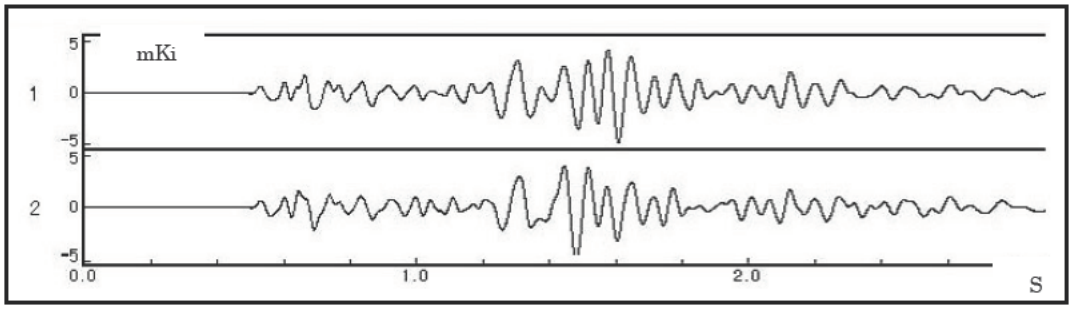


図 2.30 微小地震による波形例

(4)発破振動

対象地区の近傍で発破作業が行われている場合、その振動を検知する可能性は極めて高い。発破作業としては、別線ルートなどのトンネル掘削、採石場、原石山(ダム)や工場などの造成地などが想定される。

多くの工事現場では、発破振動の振幅を低減させるために「多段発破」が実施されていることが多いが、発破振動は

・近距離であれば周波数は高く、振幅も大きい

・継続時間は発破段数によって大きく異なる

という特徴が見られる。

図 2.31 は、5 段発破の例であるが、継続時間を「約 0.3 秒×5 発」と判定するか、全体で「約 2.4 秒」と判定するか、システム設計上極めて悩ましい問題である。

仮に、低周波ならばフィルターによる除去が可能である。

計測器内に波形を分別するアルゴリズムを組み込む場合では、継続時間による除去も可能かもしれない。

しかし、アルゴリズムによっては、下図のケースで「5 個の落石を検知した」という誤ったメッセージを発信する可能性があるため、デジタル処理を実施する際には十分留意すると共に、近隣で発破作業を伴うような工事が行われている場合、発破記録を入手して検出記録をキャンセルするような仕組みを考える必要がある。

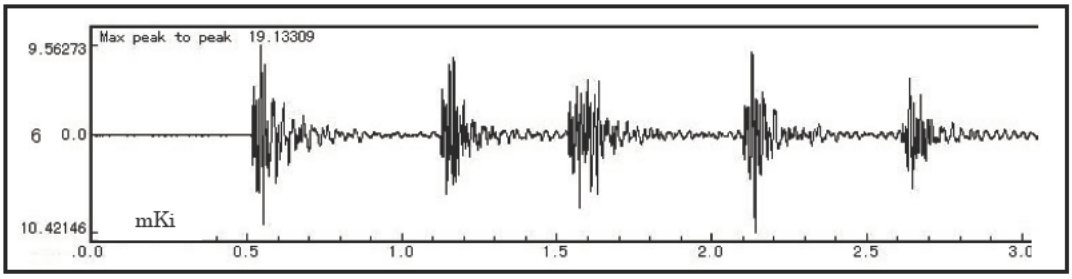


図 2.31 発破振動による波形例

(5) 人工振動(原因不明含む)

図 2.32 で「□」で囲んだ部分はハンマーでセンサー近傍を打撃した時の波形であり、「○」の部分は「原因不明」の振動である。

ハンマーなどによる「打撃振動」は、落石が直接矢板に衝突した時の振動と極めて類似しているので、除去するにはカメラ監視などの併用が必要となる　。

人工的な振動には，「バケット掘削」，「コンクリート等の破砕」，「重錘等の落下」，「くい打ち」など千差万別であり、検知場所付近で工事が行われている時間帯は検知システムの稼働を停止させることも視野におく必要がある。

「航空機の爆音」や「花火の破裂音」などの音源は、前述の自動車走行時の風圧と同様、仮設防護柵の自由振動を誘起する可能性がある。

仮設防護柵の防振措置、あるいは自由振動の周波数帯を除去するフィルターのいずれかが必要かもしれない。

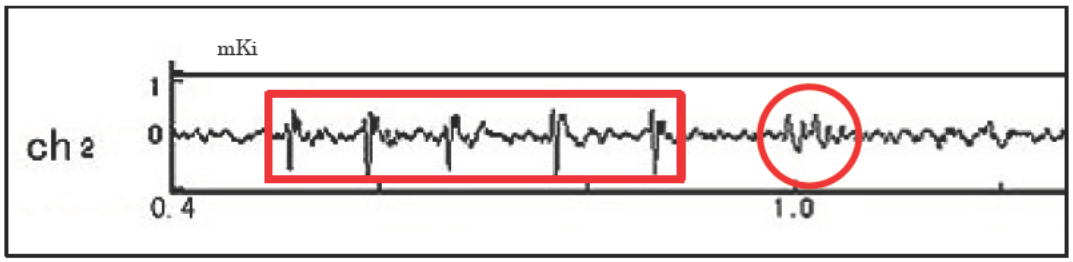


図 2.32 人工振動による波形例

2.3.3 落石の検知に適したセンサーの選定

落石・小崩落の衝撃時の仮設防護柵の振動測定には振動計を用いる。振動計には、「測定する対象別（出力種類）」によって、変位型、速度型および加速度型の 3 種類に区分され、測定目的や測定対象別に使い分けている。一方で、「変換方法」によって、動電式と圧電式、その他に分けられる。本研究で利用した振動計は、動電式の速度型振動計と、圧電式の加速度型振動計である。それぞれの特徴について以下に示す。

動電式（動コイル方式）の速度型振動計は、一定の磁場内をコイルが運動する場合に、その速度に比例した誘導起電力が発生することを利用したものである。外部電源を必要とせず、出力インピーダンスが低いためノイズも少なく、使いやすい特徴がある。古くから地震計として地震観測などの地盤振動測定に広く利用されている。図 2.33 に今回使用した動電式速度型振動計を示す。

圧電式（圧電素子式）の加速度型振動計は、チタン酸バリウムなどの圧電素子において、特定の結晶方向に力を加えると電位差が生じる現象（圧電効果またはピエゾ効果）を利用したものである。発生する電位差は加速度に比例する。広い周波数範囲の振動の測定が可能であり、また小型、軽量であるため、公害振動や工場内の機械振動、一般的な構造物の振動などの測定に広く利用されている。図 2.34 に今回使用した圧電式加速度型振動計を示す。

なお、圧電式加速度型振動計については、近年の電子工学分野の MEMS（Micro Electro Mechanical System）技術の進展により、図 2.35 に示すように数ミリサイズの半導体式の加速度センサーが開発されている。また、加速度センサーに加えて A/D 変換および周波数・振幅レベルの解析機能が電子回路上に超小型化され、それらが一つの電子基板に集約された汎用デバイスも開発・商品化されており、自動車や家電の制御用電子部品として広く利用されている。

以上に示した振動計は、屋外設置のための必要な処置（耐候性のある筐体への収納など）により、いずれも落石・小崩落の検知に十分利用できるといえる。

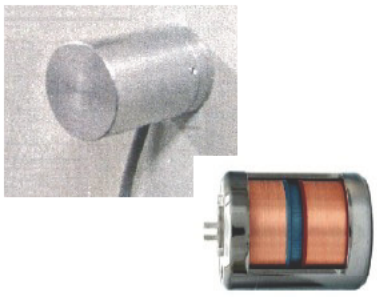


図 2.33　動電式速度型振動

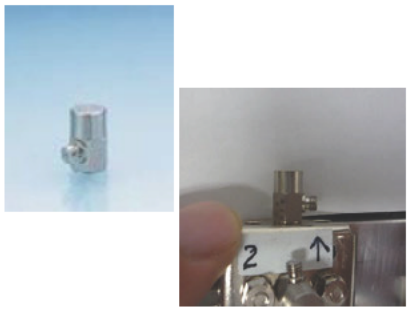


図 2.34　圧電式加速度型振動計

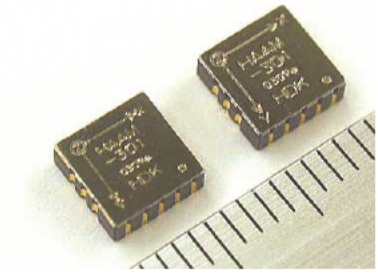


図 2.35　MEMS 加速度センサー

2.3.4　検知センサーに求められる性能

図 2.36 は、振動計測による崩落検知センサーの基本的機構の説明図である。崩落検知センサーには、次の 3 つの機能が求められる。

・振動を速度、加速度の出力で測定する機能　　**→測定機能**

・測定されたアナログ（電流、電圧）の振動データをデジタル値に変換する機能

→A/D 変換機能

・変換されたデジタル値のうち、交通振動などの落石衝撃以外の振動成分（周波数成分）をノイズとして取り除き、ある一定の振幅レベルを超過した場合、崩落として検出する解析機能　　**→演算処理機能**

したがって、崩落検知センサーは、前述した振動計と A/D 変換機能や演算処理機能が組み込まれたパーソナルコンピュータなどの電子機器を組み合わせる必要がある。

A/D 変換器や演算処理を行う機器には、落石衝撃の振動を的確に捉えるためのサンプリング速度（周波数）や処理速度が求められる。特に、A/D 変換時のサンプリング周波数が低いと落石衝撃と他のノイズ振動との切り分けができなくなる。また、自然条件の厳しい山間地に設置するため、長期安定性や耐久性が求められる。

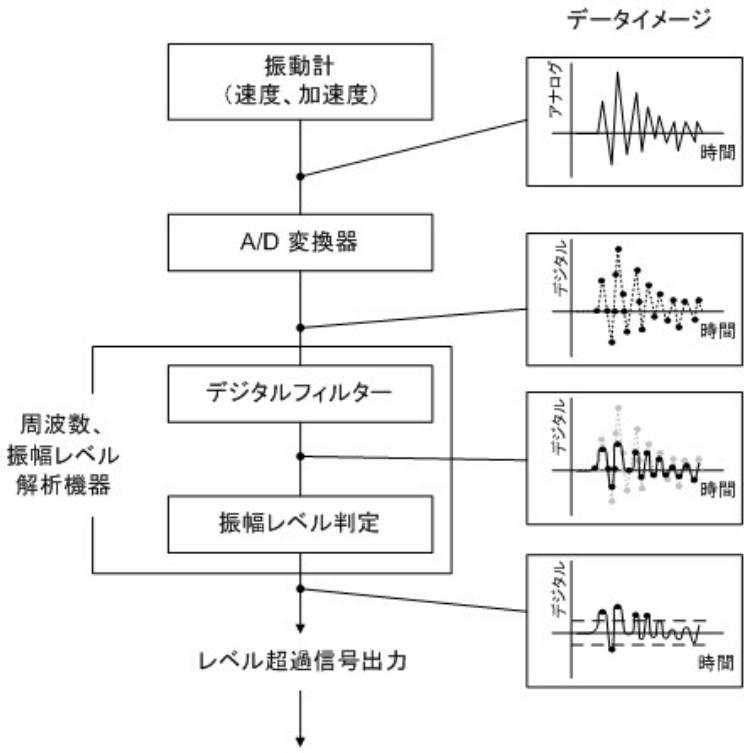


図 2.36　振動計測による崩落検知センサーの基本機構

【第 2 章　参考文献】

1)「藤澤和範、小原嬢子 : 画像解析からみた東横山地すべりの活動履歴、地すべり研究 No.51,PP.8-17,

2) 河合成司、岡田藤博、吉田宇男、木下慎逸 : 2006(平成 18)年 5 月 13 日岐阜県揖斐川町で発生した東横山地すべり、日本地すべり学会誌、Vol.43,No.3、pp.35-38、2006

3) 北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会 : 北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会報告書資料集、2000

4) 石田毅、西川直志、北村晴男、田仲正弘、古屋憲二 : 山口市鳴滝地区岩盤崩落地点における変位と AE 測定による不安定岩塊の挙動監視、土木学会論文集 No.722/Ⅱ-61、pp.345-355、2002 年

5) 辰巳洋二郎、中村孝幸 : 奈良県大塔村国道 168 号線における地すべり災害事例、地質と調査、2005 年

6) 西岡篤 : 徳島県で発生したトップリングを伴う斜面崩落についてー徳島県三好市平上地区ー、治山第 54 号、pp.110-113、2009 年

7) 建設省河川局砂防部 : 新・斜面崩壊防止工事の設計と実例-急傾斜地崩壊防止工事技術指針-、参考編、社団法人全国治水砂防協会発行、pp.255-259、1982

8) 国土交通省 : 国土交通省土木工事積算基準、平成 21 年度版、財団法人建設物価調査会発行、pp.343-346、2009

9) 財団法人　経済調査会 : 建設マネジメント技術、8 月号、pp.75-77、2000

3. 検知センサーの基礎実験

3.1 土木研究所構内の基礎実験

3.1.1 実験目的

仮設防護柵への落石や土砂崩落を再現するとともに、衝撃による防護柵の振動を測定することで、振動計（速度型もしくは加速度型）を用いた斜面の崩落検知センサーを開発する上で必要な基礎データ（振幅特性、周波数特性など）を得ることを目的とする。

3.1.2 仮設防護柵

(1) 仮設防護柵の諸元

実験に用いた仮設防護柵の諸元は下記のとおりである。また、詳細図を図 3.1 に示す。

・延長×高さ（m）：4.0×4.0

・支柱（mm）　　：H 形鋼　150×150×7×10

・横矢板（mm）　：軽量鋼矢板　LSP-Ⅱ型　板厚 t=5　板幅 W=250

　　木矢板　板厚 t=36　板幅 W=200

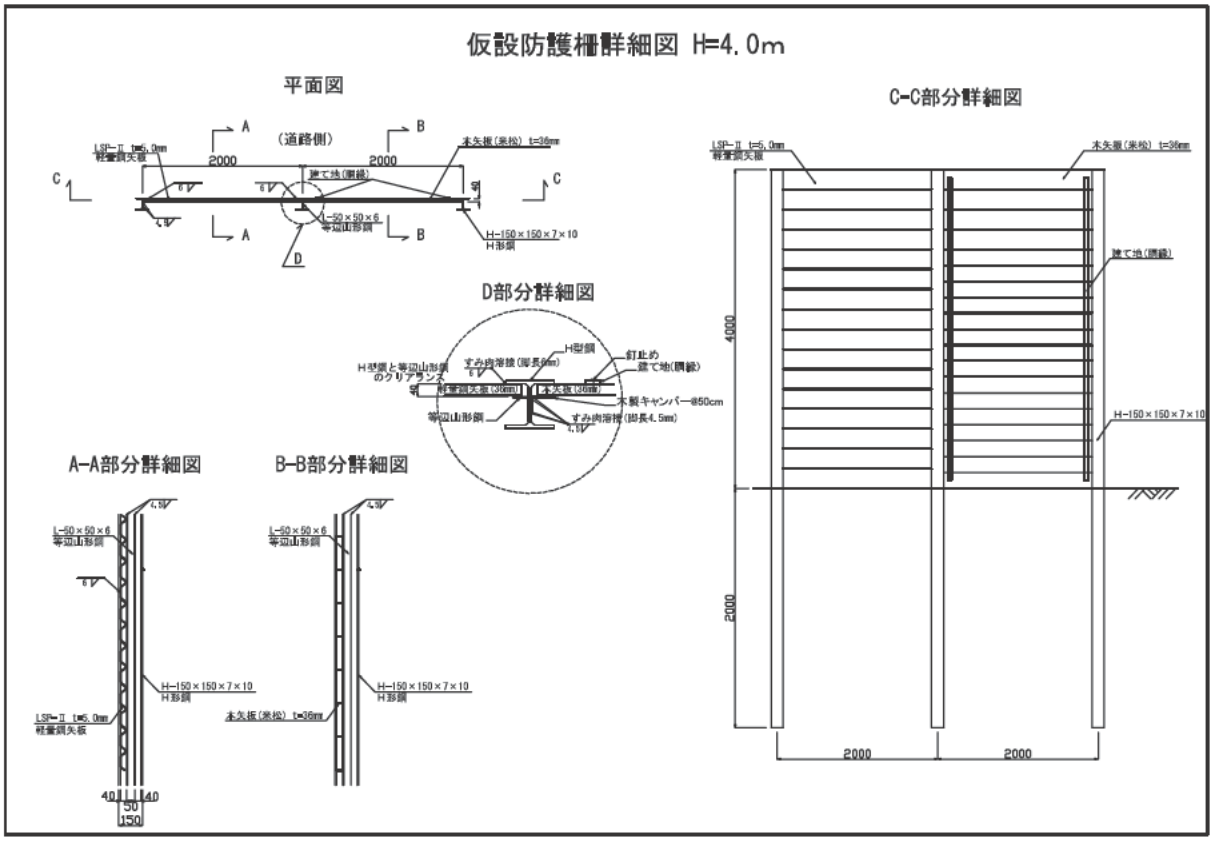


図 3.1　仮設防護柵詳細図

(2) 諸元の決定理由

2.2.2 項、既往の設置事例調査結果より支柱部材は H 形鋼を選定した。また、最も事例の多い支柱高さ（4.0m）及び支柱間隔（2.0m）とし、土留材は、事例の多い鋼製横矢板と木製横矢板を 1 スパンずつ設置することとした。

(3) 仮設防護柵設置工事の概要

①設置場所

土木研究所土工管理実験場

②工事数量

表 3.1　使用資材一覧表

名称	規格・寸法	数量	備考
H形鋼	H-150×150×7/10　L=7.0m	3本	バイブロハンマー打設
横矢板	軽量鋼矢板　LSP-Ⅱ　L=2.0m	16枚	
	木矢板　　t=36mm　L=2.0m	20枚	
固定金物	等辺山形鋼　L-50×50×6	16m	
木製キャンバー	長辺100mm×短辺30mm×厚100mm	40個	
建て地	胴縁（木製）15×45　L=4.0m	2本	

③主要使用機械

表 3.2　主要使用機械一覧表

名称	規格・寸法	数量	備考
ラフタークレーン	25ｔ	1台	
バイブロハンマー		1台	
高所作業車	低揚程	1台	
発電機	75KVA	1台	
溶接機	300A	1台	
ガス溶断器		1式	

④施工フロー

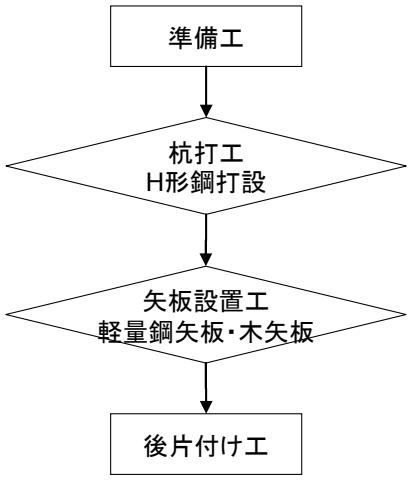


図 3.2　施工フロー

⑤工事状況

写真 3.1　H 形鋼打設状況

写真 3.2　横矢板設置状況

写真 3.3　完了全景

3.1.3　実験計画

(1) 振動測定方法及び計測機器の　　設置の概要

①振動測定方法

加速度型振動計及び速度型振動計を用いて、振動波形データを測定する。

②振動計位置

図 3.3 に示すとおり、支柱に 3 箇所（4 分の 1 高さ、2 分の 1 高さ、4 分の 3 高さ）、及び横矢板に 1 箇所、斜面と反対側に取り付ける。

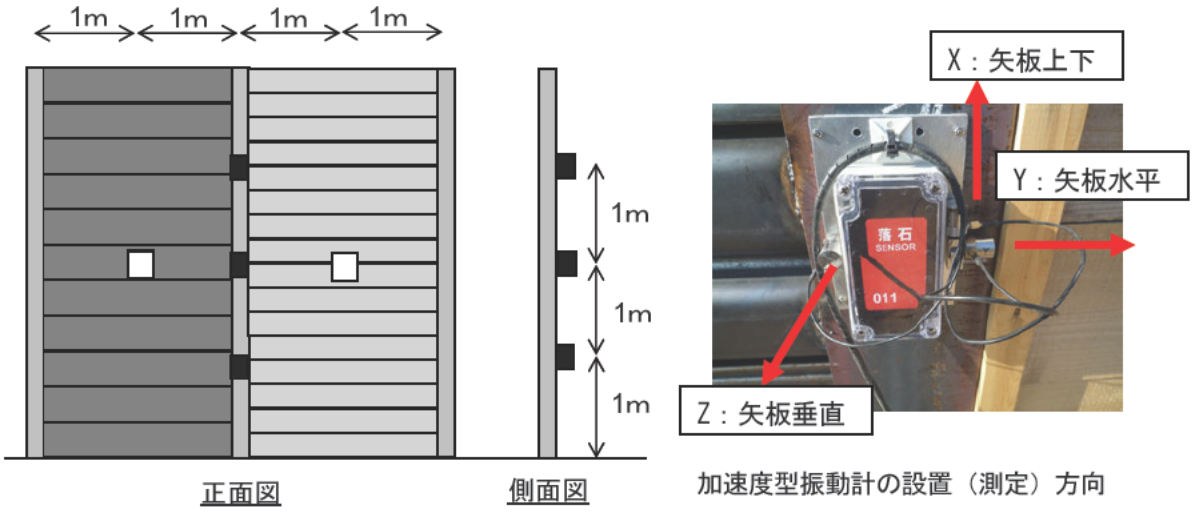


図 3.3　振動計設置計画図

③振動計の取付け方法

振動計は、次のとおり取り付ける。

- 加速度型：永久磁石がついたプレートに取りつけ、H 形鋼に貼り付ける。加速度型は H 形鋼のみ設置する。加速度型は 3 成分（上図参照）の測定を行う。
- 速 度 型：H 形鋼には両面テープを用いて取付け、木製横矢板にはビス留めで取付ける。速度型は Z 方向のみの測定を行う。

④その他

落石等の落下状況をビデオカメラで撮影する。

(2) 防護柵に作用させる振動（衝撃）条件ごとの実験

①振り子方式衝撃実験（鉄球）

- 仮設材を使用して、図 3.4 に示す振り子方式実験台を設置する。振り子方式により鉄球を用いて、背面側に一定の衝撃エネルギーを与える。
- エネルギーの違いによる振動特性の変化を確認するため、図 3.5 に示す鉄球（質量 m=1.0、2.0、4.0kg）の落下高さを h=0.5m と一定とし、E=4.9、9.8、19.6J の 3 とおりの衝撃エネルギーを与える。
- 衝撃位置は、部材や衝撃を与える位置の違いによる振動特性の変化や振動の減衰程度を確認するため、図 3.6 に示すとおり、一定間隔のメッシュ交点とする。

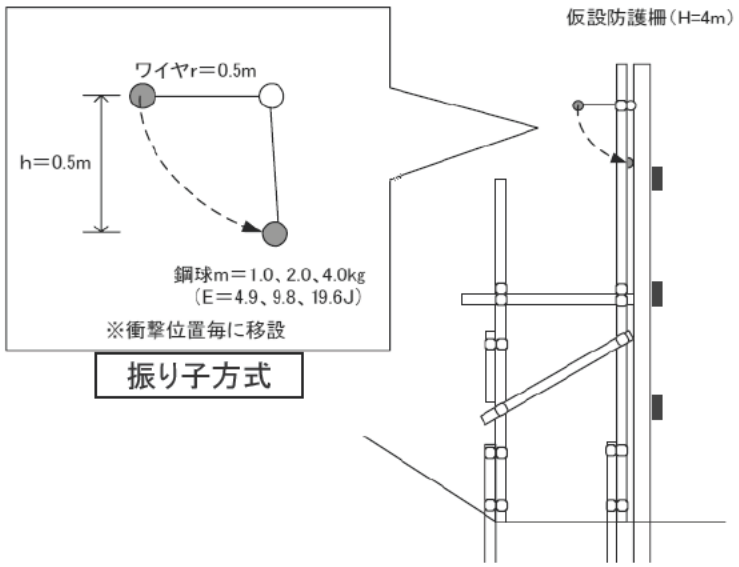


図 3.4　振り子方式実験台概要図

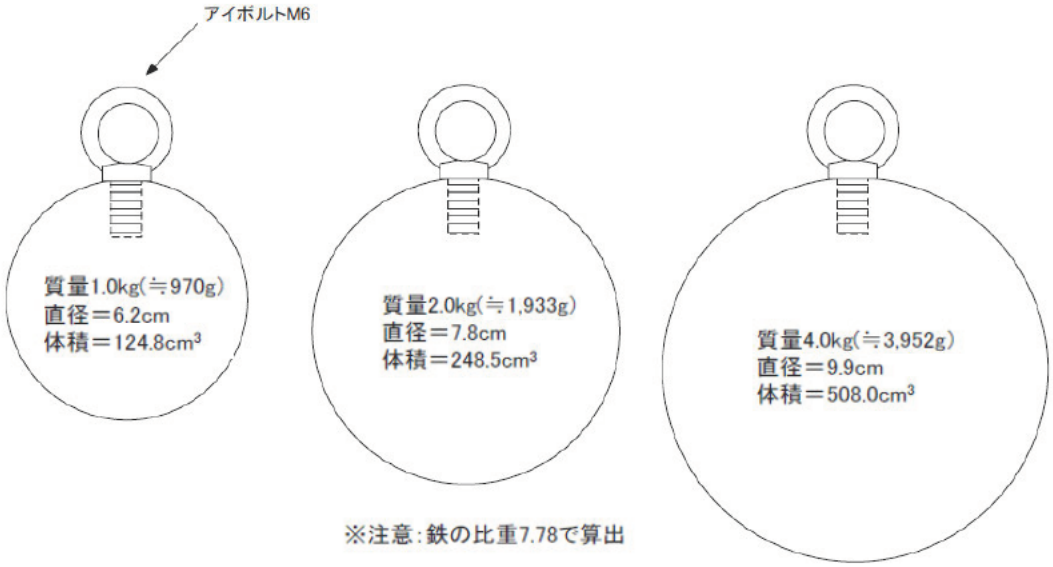


図 3.5　鉄球寸法図

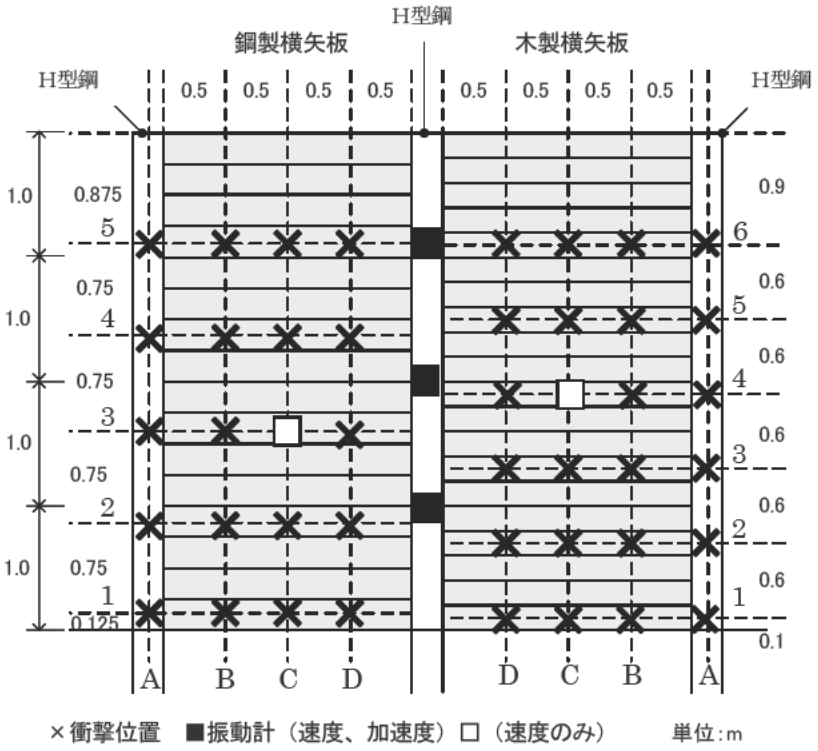


図 3.6　衝撃位置図

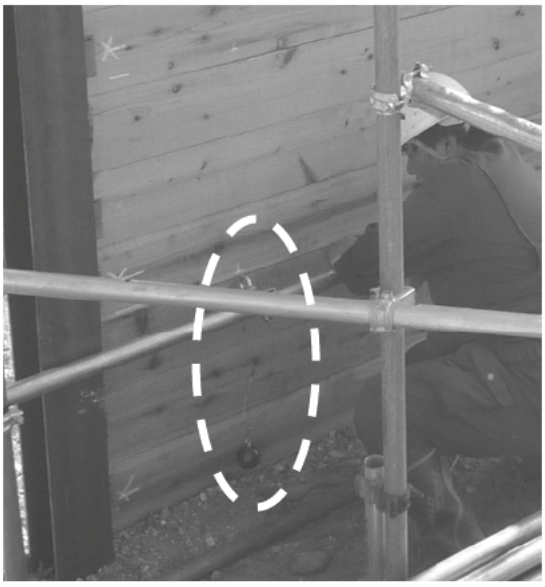


写真 3.4　振り子方式鉄球実験，衝撃位置状況

②傾斜台を用いた衝撃実験（鉄球、玉石）

- 仮設材を使用して、図 3.7 に示す傾斜台（斜面長 4m、斜面勾配 35 度）を設置し、シュート方式により落石、土砂崩落状況を再現する。
- 傾斜台の位置は、①落石が直接矢板にぶつかる、②落石が地面にリバウンドして矢板にぶつかる、③崩落土砂が矢板に押し寄せる、といった 3 とおりの現象を再現できるように調整する。
- 落下物の材質及び形状は、玉石：φ5、10、20cm、土砂：砕石と砂（もしくは土）の混合物とする。土砂の配合割合は、傾斜台を用いた予備実験にて、崩落土砂が矢板に押し寄せる現象をうまく再現できるかどうか実際に土砂材料を投下させ確認した上、投下材料の調整・準備の段階で決定する。
- 衝撃位置は、振り子方式衝撃実験を踏まえて代表的な位置になるように調整する。

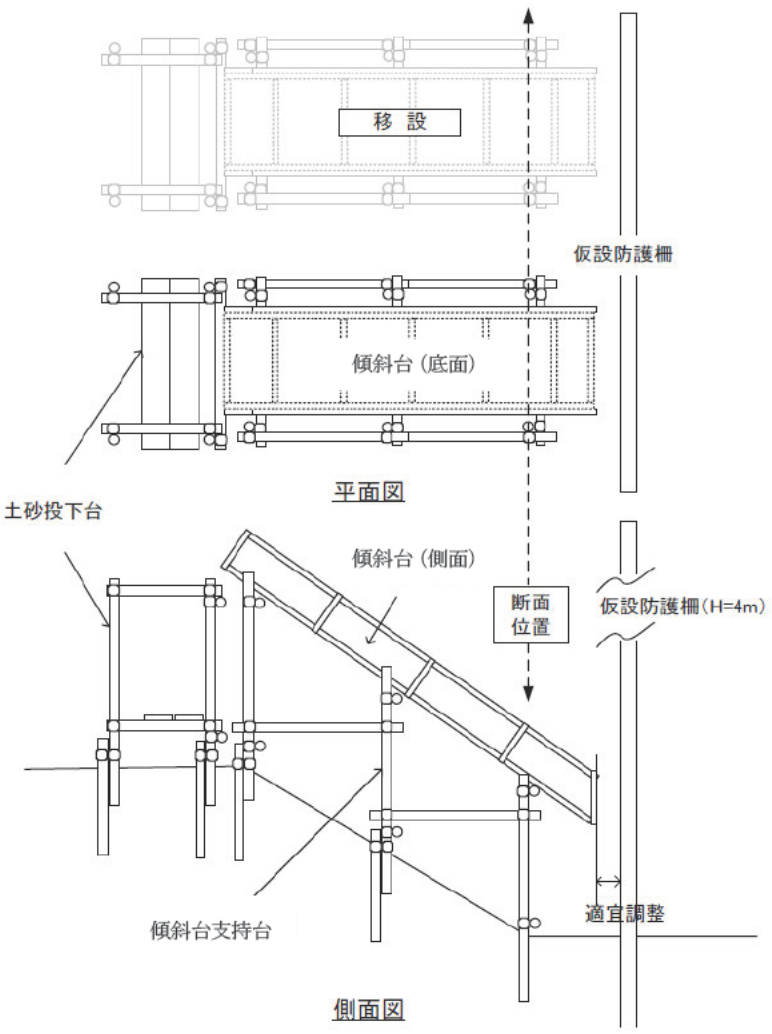


図 3.7 傾斜台設置概要図

写真 3.5　傾斜台設置状況

写真 3.6　傾斜台設置状況（シュート部上方より撮影）

③模擬振動実験（タンピングランマー）

- 締固め機（タンピングランマー、10～12Hz）により、地盤を介して擬似的な交通振動を仮設防護柵に作用させる。
- タンピングランマーの起振位置は、図 3.8 に示すとおり 5 箇所とする。すなわち、起振位置に対して以下の振動を対象とする。
  - ① 鋼製横矢板側の H 形鋼前面　：鋼製横矢板、H 形鋼及び地盤を伝わる振動
  - ② 鋼製横矢板中央前面　　：鋼製横矢板と地盤を伝わる振動
  - ③ 振動計取付 H 形鋼前面　　：H 形鋼と地盤を伝わる振動
  - ④ 木製横矢板中央前面　　：木製横矢板と地盤を伝わる振動
  - ⑤ 木製横矢板側の H 形鋼前面　：木製横矢板、H 形鋼及び地盤を伝わる振動

・ 振動源の基礎データを得るため、タンピングランマー起振位置（地盤）の振動特性も確認する。

・ なお、本試験は加速度型のみの測定とした。

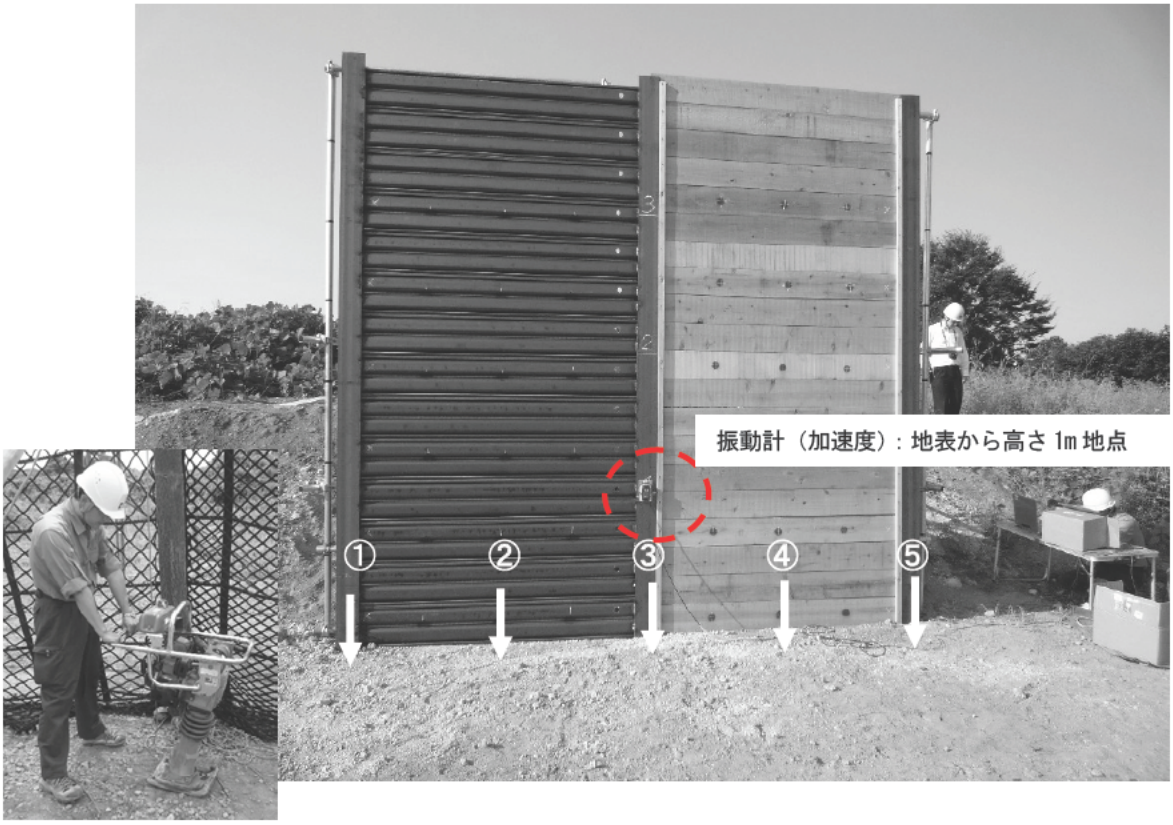


図 3.8　タンピングランマー起振位置とタンピングランマー

3.1.4　実験結果

(1)　速度型振動計による実験結果

① 周波数特性

図 3.9 に、振り子方式による鉄球衝撃時の周波数特性の比較を示し、以下に速度型振動計を使用して測定した場合の振動周波数の特徴をまとめた。

＜鋼製横矢板＞

- 鋼製横矢板の場合に大きく検出されている約60Hz以下の周波数成分波は、防護柵（横矢板とH形鋼）の固有振動数と考えられるので、以後考慮しないことにする。
- ピークを示す周波数は、約80Hz、100Hz～120Hz及び約200Hzであるが、衝撃位置によってピーク周波数が異なる傾向がみられる。すなわち、H形鋼に近い支持部（4-B、4-D）に衝撃を与えた場合では、約80Hzや100Hz～120Hzのピークが相対的に大きいが、中心部（4-C）に衝撃を与えた時には小さくなっている。

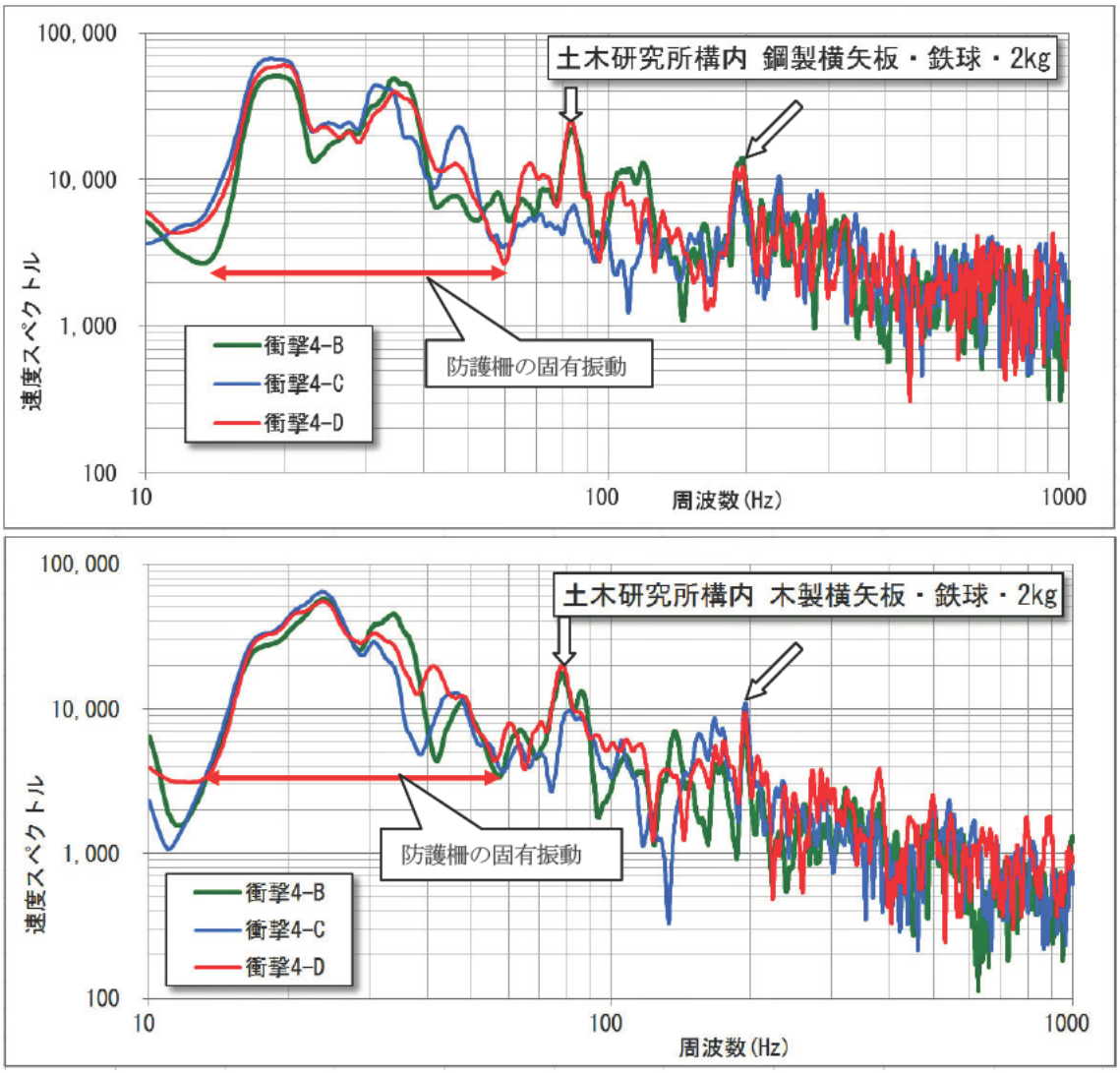


図 3.9　鉄球衝撃による衝撃波形の速度スペクトルの比較(測定：H 形鋼，高さ 1.0m)

・ 約200Hzのピーク値は衝撃位置にかかわらず、ほぼ同一値を示している。

＜木製横矢板＞

・ 木製横矢板の場合では、防護柵の固有振動を除くと、概ね80Hz～90Hzと約200Hzのピーク周波数が顕著に発生している。

図 3.10 にすべり台による川砂や玉石が衝撃した時の波形を、図 3.11 は、同じく周波数特性を示す。

速度型振動計による実験結果から、川砂や玉石による衝撃波形の振動周波数の特徴について下記知見が得られた。

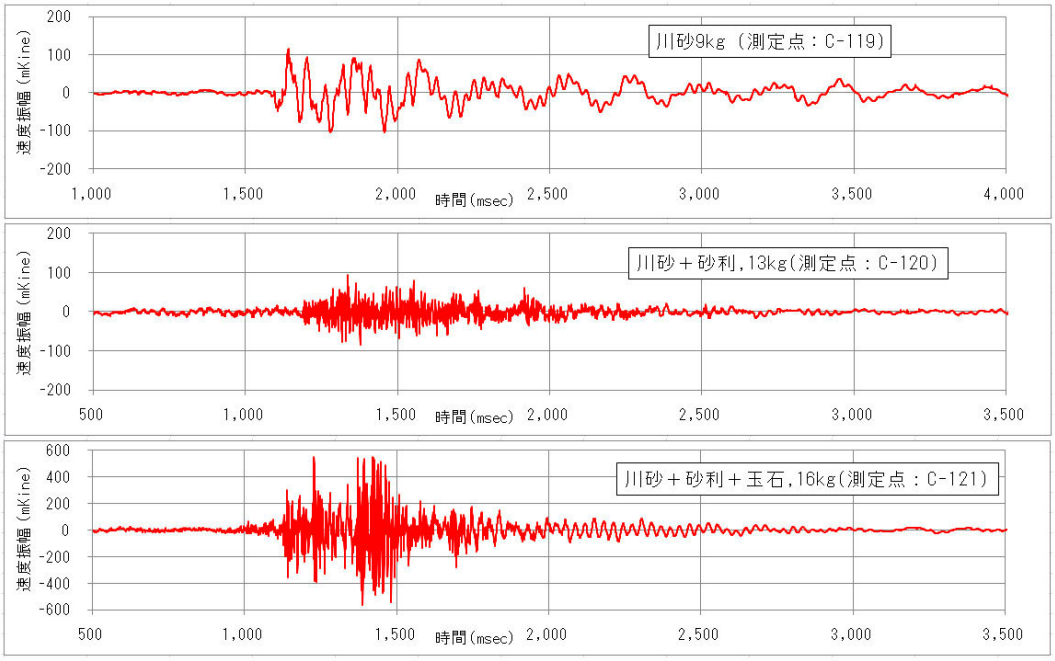


図 3.10　川砂や玉石による衝撃波形の比較(鋼製横矢板，計測点：H 形鋼，高さ 3.0m)

・ 最も衝撃力が小さいと思われる「川砂」で周波数が約4.4Hzの自由減衰振動が発生しているが，他の2ケースでは殆ど発生していない。

・ 図3.10に示したように、「川砂のみの衝突」による振動が低周波であることは、衝突速度が最も遅いことに起因している。

・ 図3.11（上）に示す鋼製横矢板のスペクトルでは、約90Hz～約100Hzの成分波と約240Hzにピークが存在している。

・ 一方、図3.11（下）に示す木製横矢板の場合では、概ね80Hz前後にピークが存在しているが、鋼製横矢板に存在する約240Hzのピークは存在しない。

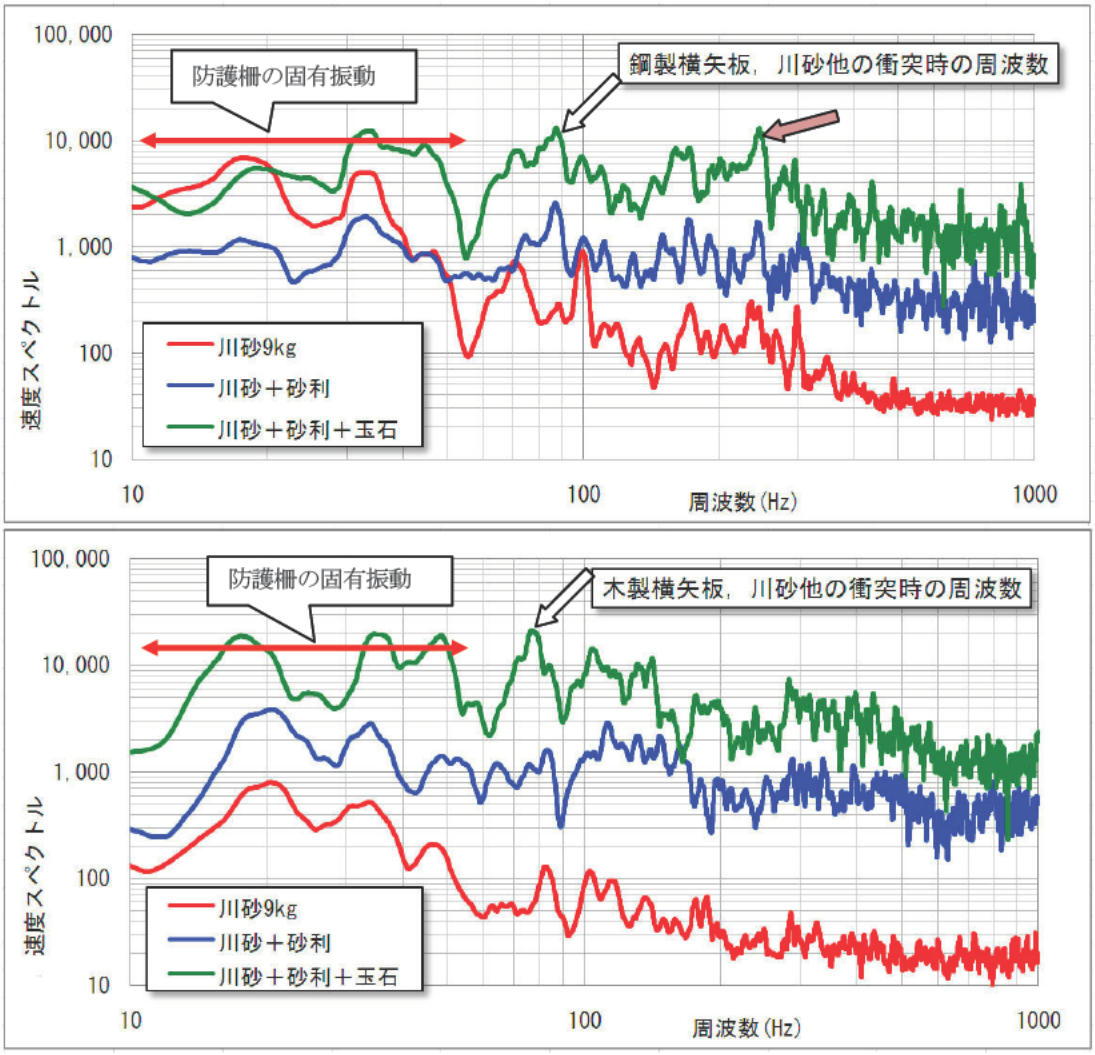


図 3.11　川砂や玉石による衝撃波形の速度スペクトルの比較(測定点：H 形鋼，高さ 3.0m)

以上をまとめると、速度型振動計を利用する検知システムの周波数域は「70Hz～300Hz」に設定すれば良いことが判明した。

川砂の衝突ように低速度で衝突する場合は、衝撃による振動自身よりも防護柵の固有振動が卓越するため、このような現象の検出について、今後慎重な検討が必要となろう。

② 振幅特性

図 3.12 と図 3.13 は、振り子方式による鉄球の衝撃を測定した結果である。以下に、速度型振動計による波形振幅の特徴をまとめる。

- 鋼製横矢板に鉄球が衝撃した時の振幅は何れもスケールオーバーしており、評価することはできなかった。
- 木製横矢板では、バラツキは存在するが鉄球の質量が増えると（衝撃エネルギーが増えると）振幅も大きくなるという正の関係が成立する。

・ 衝撃位置の相違による振幅状況は、1段目が最も小さくなる傾向がある。これは地表までの距離が短く拘束されるために、振幅が相対的に小さくなったと考えられる。

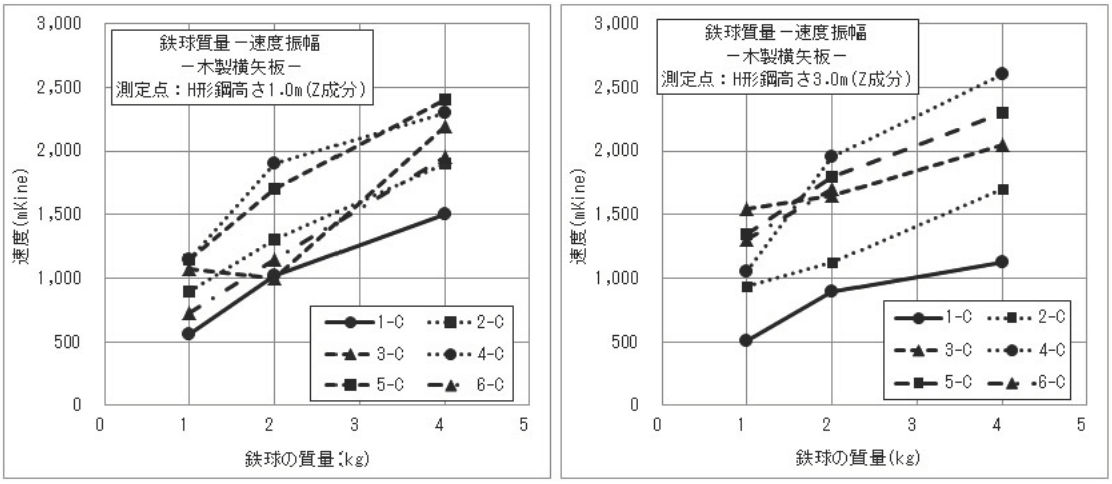


図 3.12　木製横矢板における鉄球衝撃時の最大速度振幅（1-C などは打撃点）

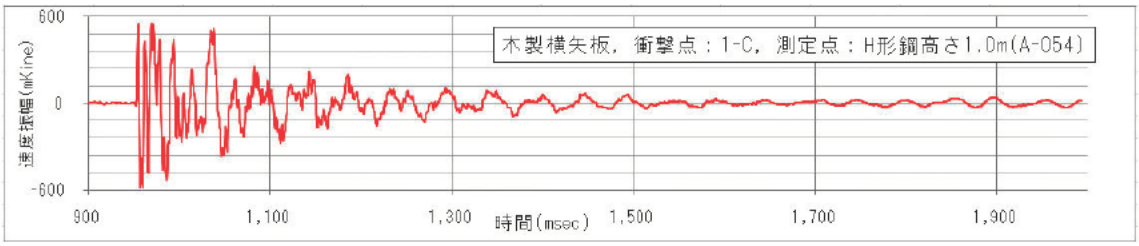


図 3.13　速度波形の例（木製横矢板，衝撃点：1-C，衝撃力：1kg，測定点：H 形鋼高さ 1.0m）

図 3.14 と図 3.15 は、傾斜台による川砂や玉石の衝撃時の測定結果である。以下に，速度型振動計による波形振幅の特徴をまとめる。

・ バラツキは見られるが玉石質量（平均値）の増大と振幅の大きさには正の関係がある。

・ 相関係数の傾斜は、木製横矢板に比べて鋼製横矢板の方が大きくなる傾向にある。

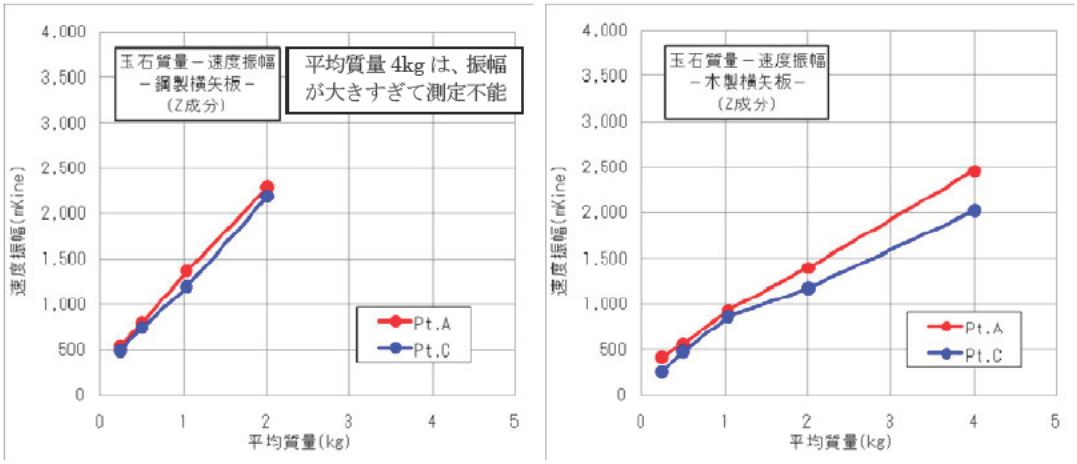
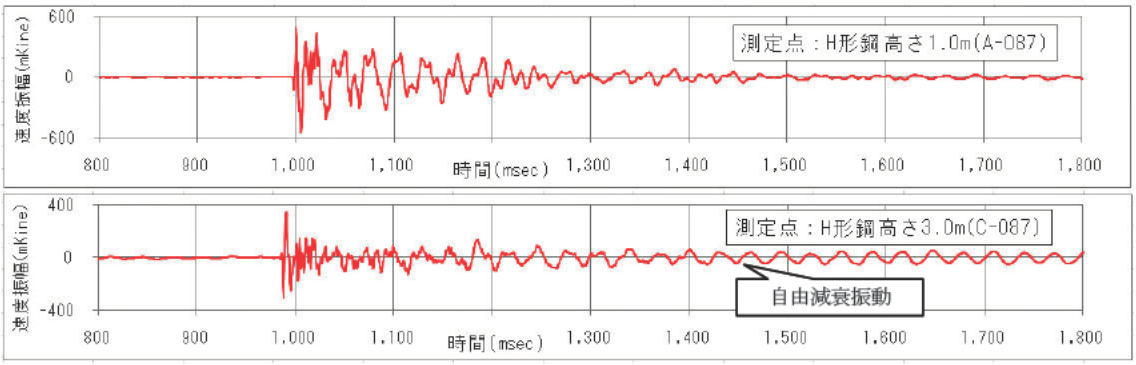


図 3.14　川砂や玉石による衝撃振動の最大速度振幅

・ 図3.15（下）の速度波形に示すように、速度型振動計をH形鋼の高さ3.0mに設置した場合、防護柵の自由減衰振動が出やすいことが判明した。



注 両者では記録器が異なるため、振動検知時刻は異なっている

図 3.15　玉石による速度波形の比較（木製横矢板、玉石：0.235kg）

③ 継続時間

振動継続時間とは，ある一定レベル以上の振幅が継続する時間のことであるが，ここではそのレベルを約 400mKine とした時の特徴を抽出した（波形によって多少前後あり）。

図 3.16 及び図 3.17 は、川砂と玉石の衝撃による振動波形の比較であるが、衝撃時の質量（エネルギー）によって継続時間が大幅に異なることがわかる。

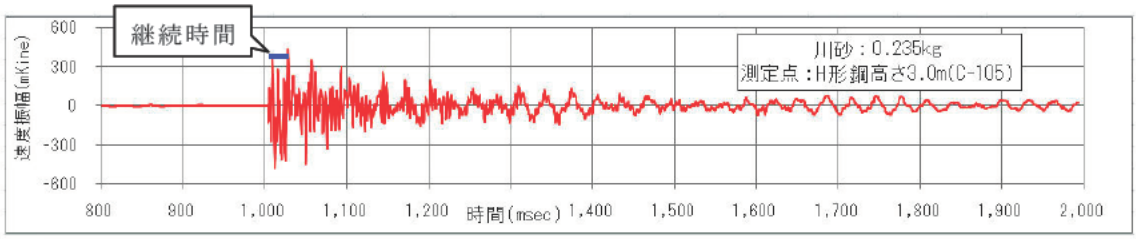


図 3.16 継続時間 1　（川砂、質量：0.235kg、測定点：H 形鋼高さ 3.0m、継続時間は約 0.02 秒）

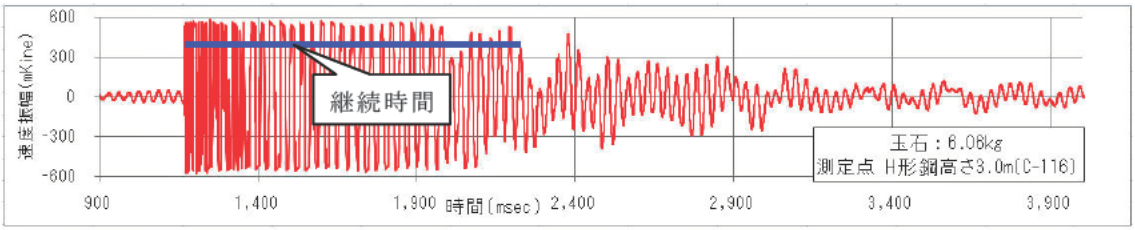


図 3.17　継続時間 2　（玉石、質量：6.064kg、測定点：H 形鋼高さ 3.0m、継続時間は約 0.95 秒）

図 3.18 は、振り子方式による鉄球衝撃時の測定結果である。以下に速度型振動計による継続時間の特徴をまとめる。

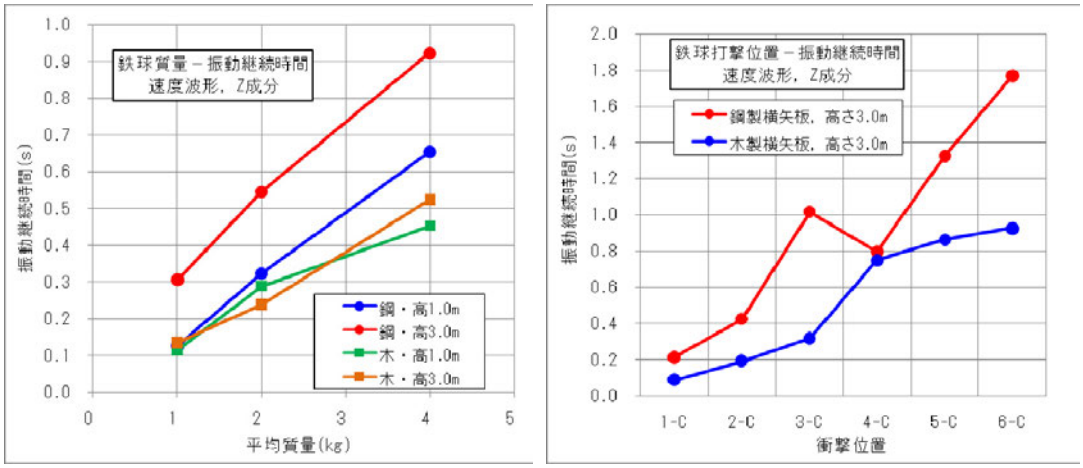


図 3.18　鉄球衝撃時の振動継続時間

- 図3.18（左）：多少のバラツキは存在するが、鉄球の質量と振動継続時間には正の関係が見られる。
- 図3.18（右）：衝撃位置が高くなるにつれ、振動継続時間が長くなる傾向がある。 これは衝撃位置が高いほど、横矢板やH形鋼の自由振動が発生しやすいためと考えられる。

図 3.19 は、傾斜台を使用した衝撃試験の測定結果である。以下に速度型振動計による継続時間の特徴をまとめる。

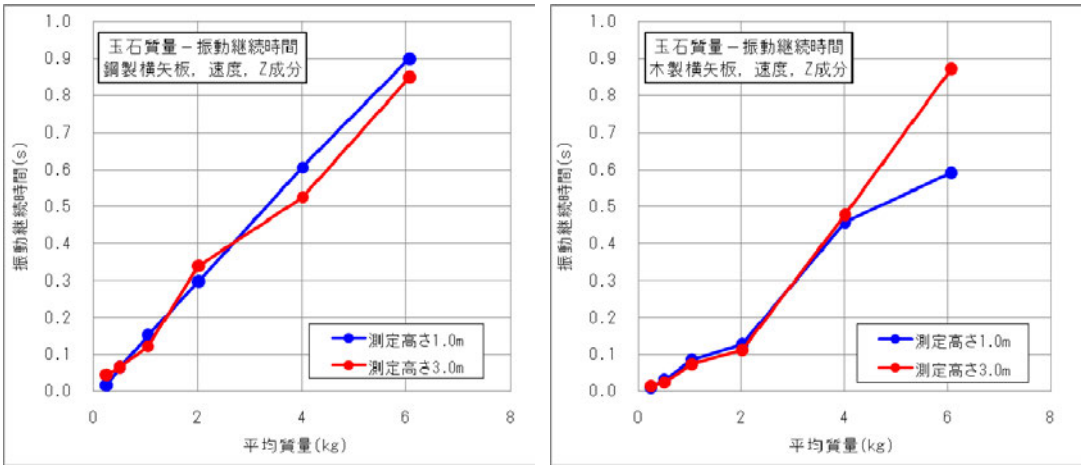


図 3.19　川砂や玉石による衝撃波形の継続時間

- 鋼製横矢板、木製横矢板ともに、多少のバラツキはあるが、玉石の質量増大と振動継

続時間には正の関係が見られる。

- 関係式の傾斜は、木製横矢板よりも鋼製横矢板の方が大きく、かつバラツキも少ない傾向を示している。これは、鋼製横矢板の方が品質のバラツキが少ないためであると考える。

④ 振動エネルギー

ここでいう振動エネルギーとは、ピーク振幅値×振動継続時間のことである。

図 3.20 は、傾斜台を使用した衝撃試験の測定結果である。以下に、速度型振動計による継続時間の特徴をまとめる。

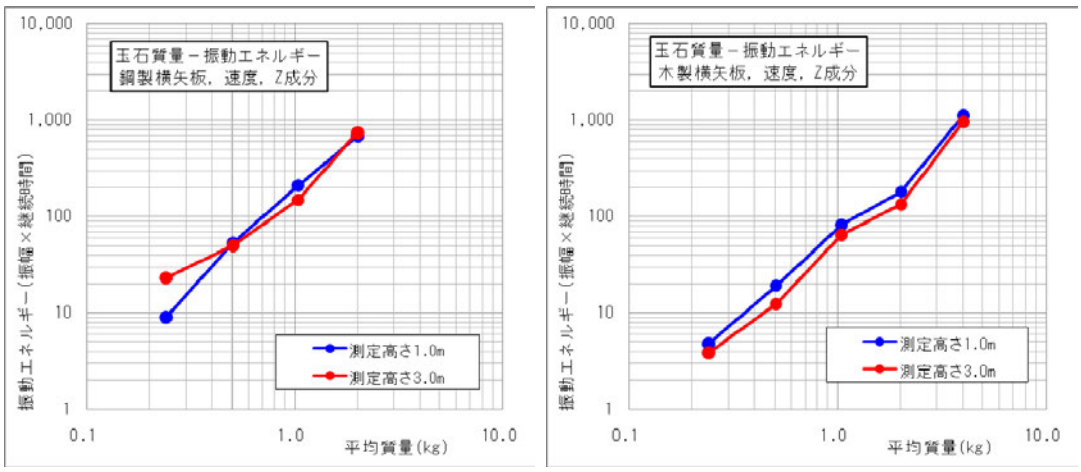


図 3.20　川砂や玉石による衝撃波形の振動エネルギー

- 鋼製横矢板、木製横矢板共「自乗相関」の傾向を示しているが、鋼製横矢板では平均質量が約2kg以下のデータしか得られていないため、確定的ではない。
- 衝突位置が上下にあまり変化しないと仮定した場合、測定した振動エネルギーの値から、衝突した石の質量をある程度推定できる可能性がある（衝突時の速度は無視）。

⑤ まとめと今後への課題

土木研究所構内の基礎実験で使用した速度センサーの評価を以下にまとめた。

- 鋼製横矢板、木製横矢板のいずれに対しても、十分な検知能力を有している。
- 速度センサーは低周波域の感度が高く、横矢板やH形鋼の固有振動を検出することが可能である。
- ただし、この周波数帯を実際に使用するか否かについては、今後の実験結果を待って評価したい。

以上の土木研究所構内の基礎実験結果から、検知センサーや検知システムの求められる性能として、以下の仕様を検討することにした。

・ 検出センサーとして、電源を必要とせず感度も高い「MC型速度型振動計」を使用する。
・ 周波数帯は70Hz～300Hzとする。
・ 振動を検出したという事実の他に「検出時刻」、「振幅」、「周波数」と「継続時間」の各値が得られる検知システムとする。
・ 振幅値と振動継続時間から「振動エネルギー」を計算し、落石の規模を推定するための検討を行う。

(2) 加速度型振動計による実験結果

①周波数特性

図 3.21、図 3.22 は、衝撃材料（振り子方式による鉄球、傾斜台方式による玉石の 2 種類）による加速度応答スペクトルの違いを、それぞれ木製横矢板および鋼製横矢板で比較したものである。図より次の点が明らかである。

- 木製横矢板については、2 種類の衝撃条件を比較すると、加速度応答のピーク周波数（卓越周波数）が、いずれの測定成分でもほぼ同じ値である。すなわち、矢板水平方向の Y 軸が 250～300Hz 付近、矢板垂直方向の Z 軸が 300～400、700、900Hz 付近のピークであった。矢板上下向の X 軸はいずれも明確なピークが認められなかった。
- 鋼製横矢板についても、木製横矢板と同様な結果であった。すなわち、矢板水平方向の Y 軸が 250～300Hz 付近、矢板垂直方向の Z 軸が 200、600～800、1,300～1,400、1,800Hz 付近のピークであった。

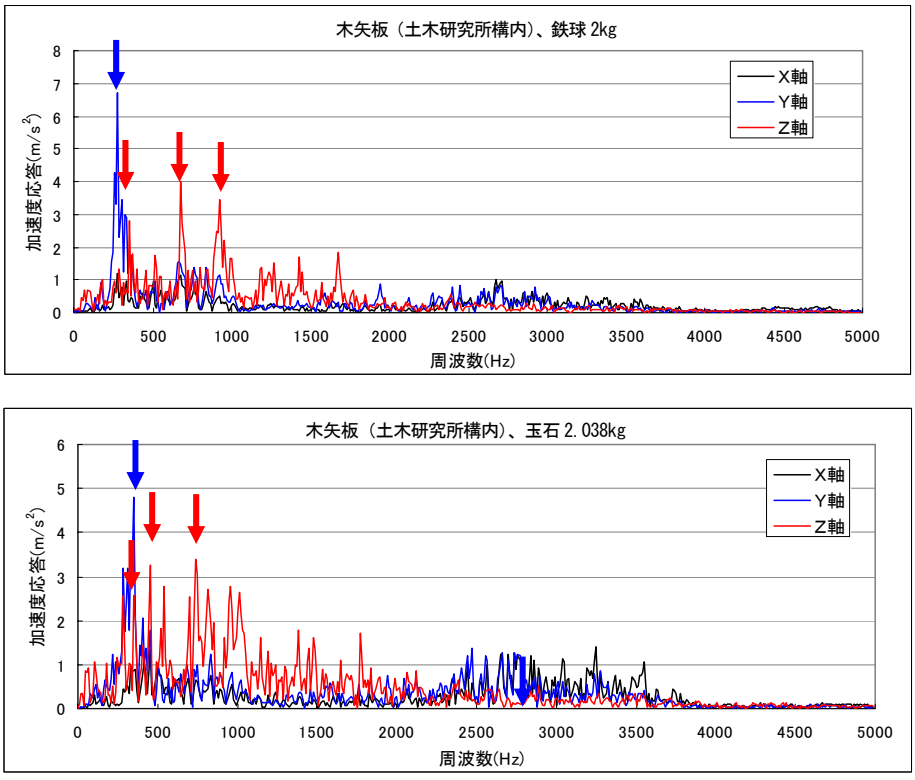


図 3.21　衝撃材料に着目した加速度応答スペクトルの比較（木製横矢板）

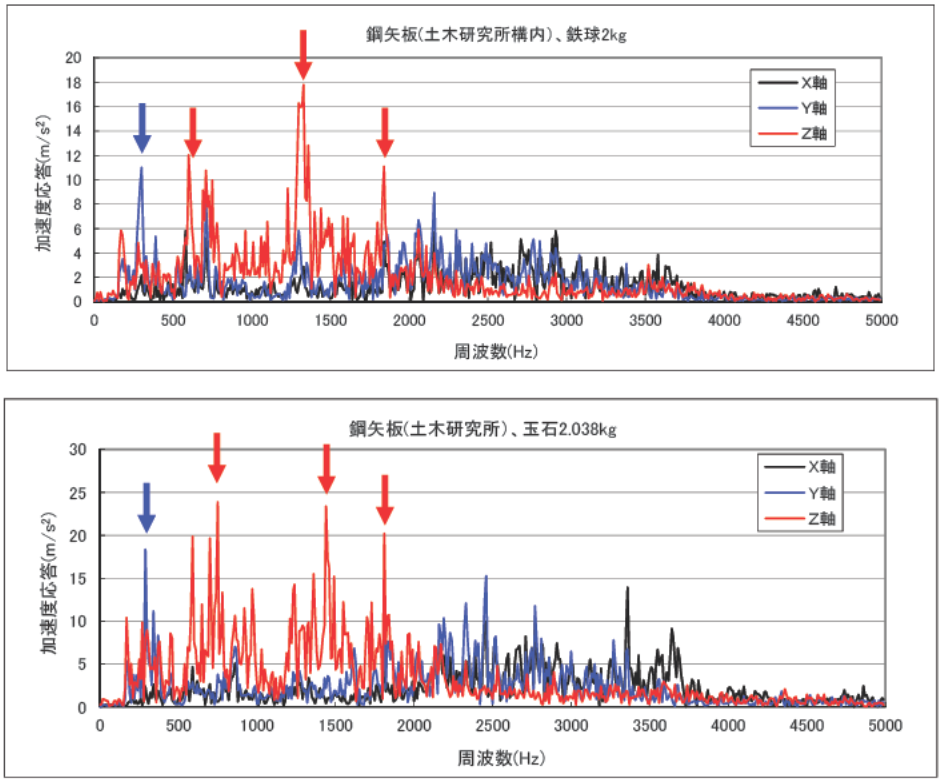


図 3.22　衝撃材料に着目した加速度応答スペクトルの比較（鋼製横矢板）

以上の結果より、傾斜台による擬似的な落石衝撃と振り子方式の鉄球による衝撃は、周波数特性の面からほぼ同じといえる。すなわち、鉄球を用いた振り子方式による簡易的な衝撃実験により擬似的な落石現象を再現できると考える。

一方、Y 軸、Z 軸については、木製横矢板および鋼製横矢板いずれも比較的低い周波数領域である 200～300Hz 付近に加速度応答のピークが認められる。この傾向は、図 3.23～3.26 に示すとおり、鋼製横矢板および木製横矢板ともに、すべり台による土砂崩落実験の 4 つの崩落パターンでも確認できた。

このように比較的低い周波数領域において落石や土砂崩落による加速度応答のピークが現地の仮設防護柵でも認められ、かつ交通車両等の落石検知に対してノイズとなる振動源の周波数と明確に区別ができれば、処理速度が比較的低くコストパフォーマンスの高いA／D 変換器でも落石衝撃と交通振動によるノイズの区別が十分可能であると考える。

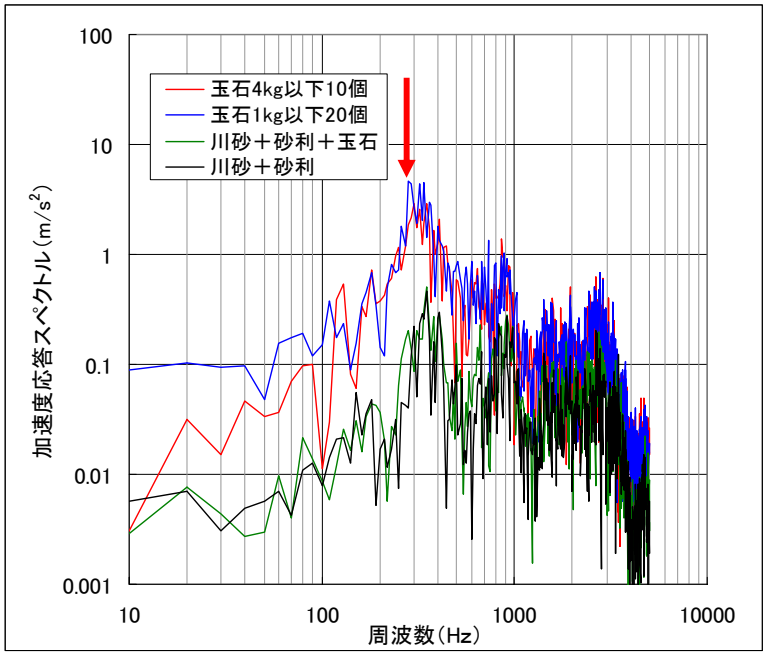


図 3.23　傾斜台を用いた衝撃実験の加速度応答スペクトルの比較（木製横矢板、Y 軸）

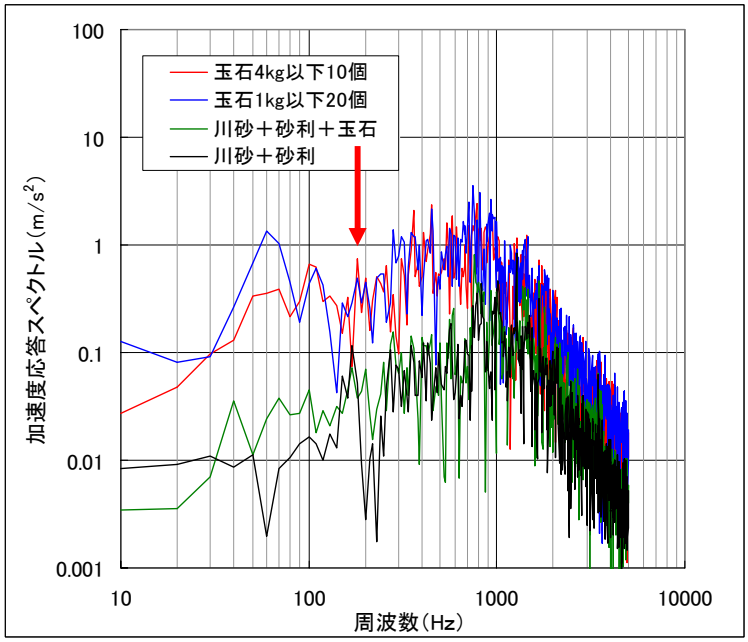


図 3.24　傾斜台を用いた衝撃実験の加速度応答スペクトルの比較（木製横矢板、Z 軸）

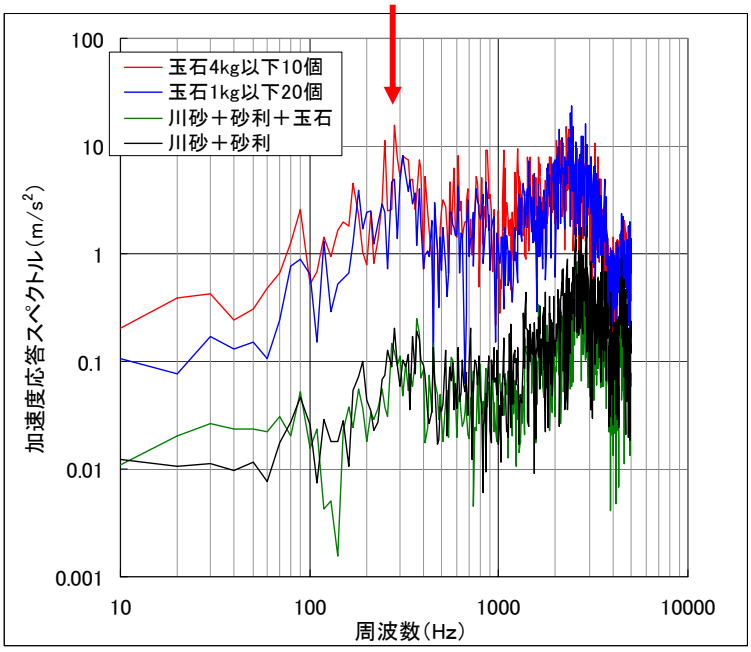


図 3.25　傾斜台を用いた衝撃実験の加速度応答スペクトルの比較（鋼製横矢板、Y 軸）

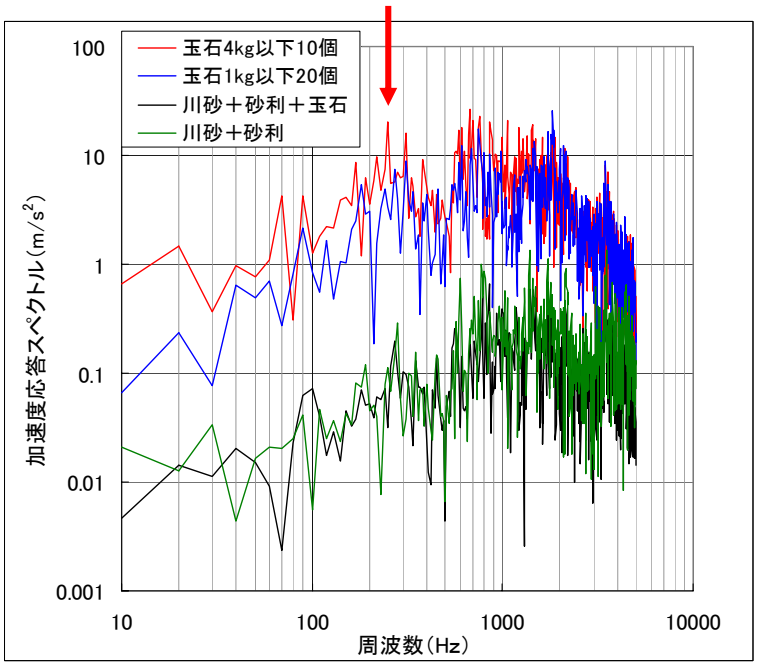


図 3.26　傾斜台を用いた衝撃実験の加速度応答スペクトルの比較（鋼製横矢板、Z 軸）

図 3.27、3.28 は、交通、工事振動をタンピングランマーにより模擬的に再現し、仮設防護柵の振動を測定したものである。いずれも、起振箇所（①～⑤）の違いによる周波数特性の違いは見られない。模擬的振動に起因した地盤面の振動と防護柵の周波数特性を比較すると、矢板水平方向の Y 軸では 50～80Hz と 300Hz 付近に、矢板垂直方向の Z 軸は 50～80Hz にそれぞれ周波数のピークが見られ、地盤のピークと合致している。したがって、これらの防護柵の卓越周波数は、地盤と防護柵の振動特性に支配された固有周波数と考えられる。このうち、Y 軸の 300Hz 付近のピークは、振り子方式や傾斜台による衝撃実験時にも認められる。したがって、Y 軸を崩落検知の振動測定成分とする場合は、落石振動と模擬的振動の卓越周期が合致する 300Hz 付近の周波数帯域を避ける必要がある。

Z 軸については、振り子方式や傾斜台による衝撃実験で確認された 200～300Hz の卓越周期に対して、模擬的振動の場合では同帯域でのピークは確認されない。したがって、Z 軸を崩落検知の振動測定成分とする場合は、崩落を選択的に検知しうる周波数帯域として 200～300Hz に着目することが考えられる。

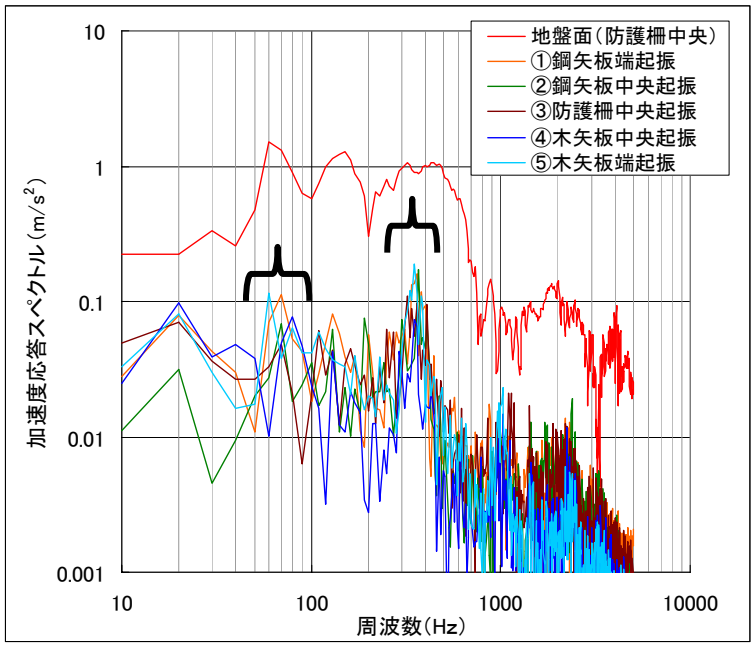


図 3.27　模擬振動実験による地盤と防護柵の加速度応答スペクトルの比較

（防護柵中央のＨ形鋼高さ 2m にセンサー設置（Y 軸）、①～⑤の起振位置の比較、地盤面は上下成分）

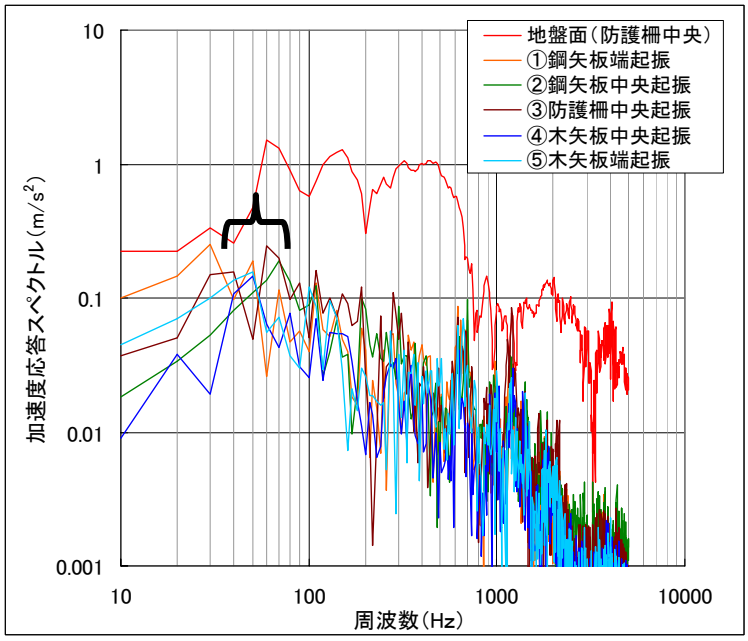


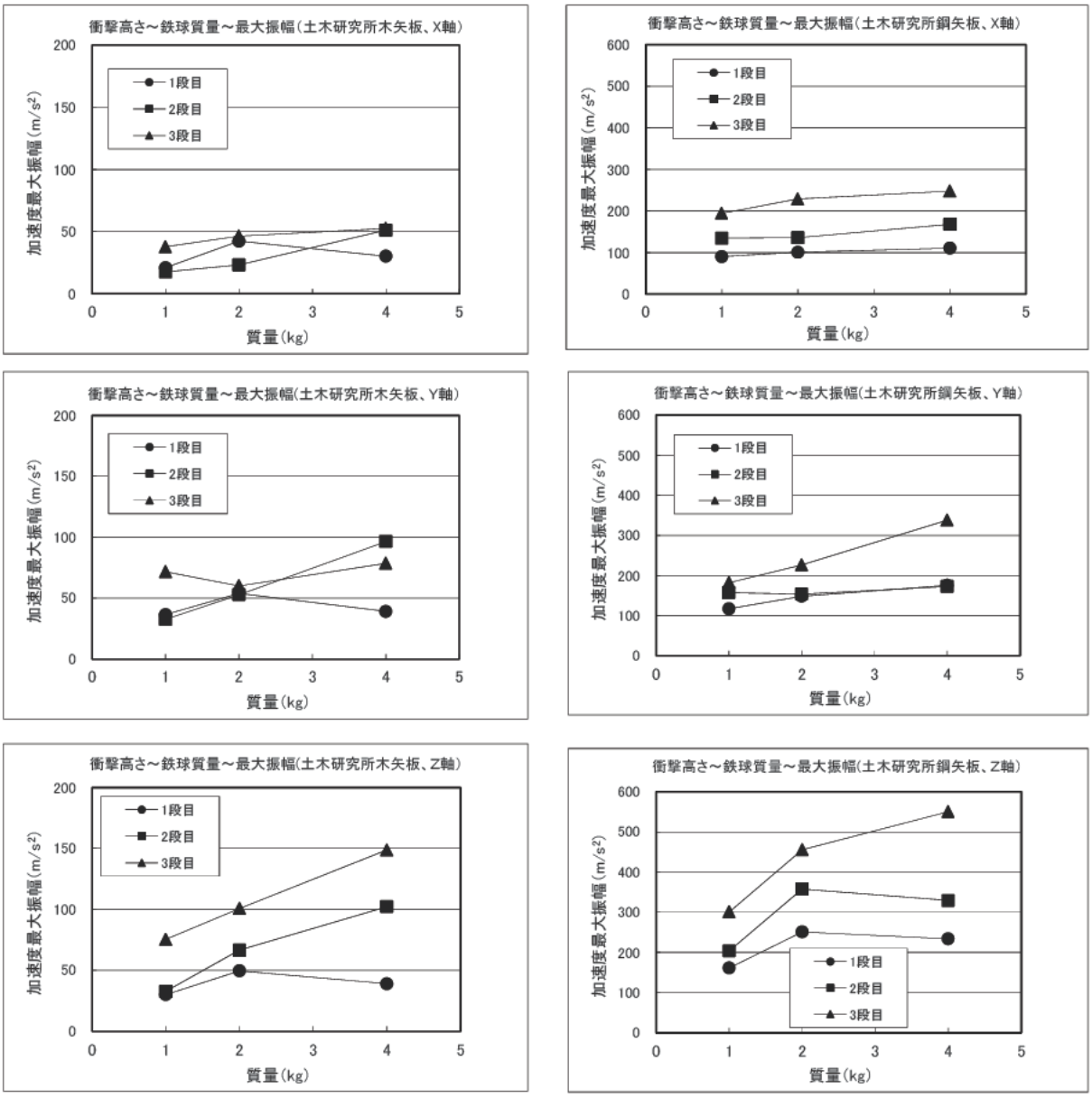
図 3.28　模擬振動実験による地盤と防護柵の加速度応答スペクトルの比較

（防護柵中央のＨ形鋼高さ 2m にセンサー設置（Z 軸）、①～⑤の起振位置の比較、地盤面は上下成分）

②振幅特性

図 3.29 は、振り子方式や傾斜台による衝撃試験において、鉄球質量、衝撃高さおよび横矢板の素材の違い（木製、鋼製）による振幅特性を比較したものである。データは振動計取り付け高さ 2m、衝撃箇所 C 点の場合である。値のばらつきはあるが、図より次の点が明らかである。

- 最大振幅の大きさは鋼製＞木製であり、衝撃材料の質量と正の相関がある。
- 木製、鋼製いずれについても、最大振幅の大きさは Z 軸＞Y 軸＞X 軸である。
- 木製、鋼製いずれにつても、衝撃高さに対する最大振幅の大きさは、3 段目＞2 段目＞1 段目（振動計取り付け位置（防護柵高の 2 分の 1：2m）に近い順）である。

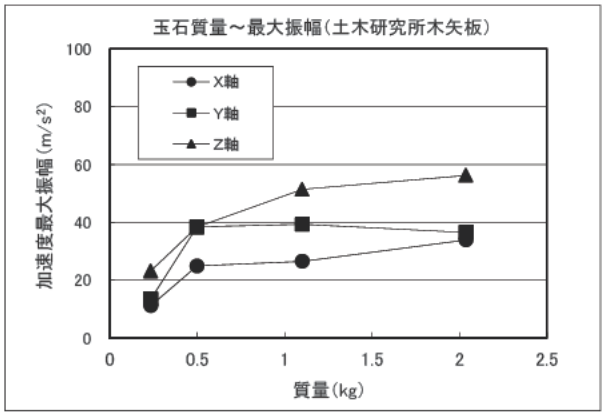


＜木製横矢板＞　　＜鋼製横矢板＞

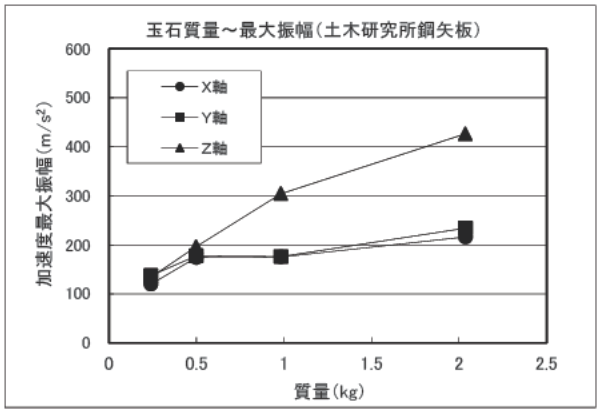
図 3.29　衝撃高さ、横矢板材料に着目した最大振幅の比較（衝撃材料：鉄球、センサー設置高 2m）

図 3.30 は、傾斜台を用いた衝撃試験において、玉石質量と横矢板素材の違い（木製、鋼製）による振幅特性を比較したものである。値のばらつきはあるが、鉄球の場合と同じ、次の点が明らかである。

- 最大振幅の大きさは鋼製＞木製であり、いずれも衝撃材料の質量と正の相関がある。
- 木製横矢板、鋼製横矢板いずれについても、最大振幅の大きさはＺ軸＞Ｙ軸＞Ｘ軸である。



＜木製横矢板＞



＜鋼製横矢板＞

図 3.30　横矢板材料に着目した最大振幅の比較（衝撃材料：玉石、衝撃高さ１段目）

以上の結果より、加速度型振動計による崩落検知においては、衝撃の最大振幅が最も小さい１段目（防護柵最下段）で測定方向３成分のうち衝撃時の振幅が比較的大きいＺ軸、Ｙ軸方向に着目して加速度振幅のしきい値を設定することが重要であるといえる。

③まとめ

土木研究所構内で基礎実験として実施した、加速度計を用いた振動測定結果より明らかとなった主な知見は次のとおりである。

- 振り子方式の鉄球と傾斜台を用いた玉石による衝撃は、周波数特性の面からほぼ同じといえる。
- 木製横矢板および鋼製横矢板のいずれについても、Ｙ軸、Ｚ軸で 200～300Hz 付近に卓越周期が認められた。Ｙ軸については、模擬的交通、工事振動による卓越周期と合致したが、Ｚ軸の模擬的振動による卓越周期は、上記の帯域では認められなかった。
- Ｚ軸を崩落検知の振動測定成分とする場合は、崩落を選択的に検知しうる周波数帯域として 200～300Hz に着目することが考えられる。
- 最大振幅が最も小さい衝撃高さは１段目（防護柵最下段）であり、測定方向３成分のうち衝撃時の振幅の大きさはＺ軸 ＞ Ｙ軸 ＞ Ｘ軸の順であった。

3.2 現地基礎実験

3.2.1 実験目的

(1) 土木研究所構内の仮設防護柵と現地基礎実験の仮設防護柵の振動特性の比較

土木研究所構内で実施した仮設防護柵の実験と同一条件で現地実験を行い、その振動特性を比較する。また、現地基礎実験における土木研究所構内の実験成果の再現性及びその有効性についても確認する。

(2) 現地の仮設防護柵の設置状況及び振動特性の把握

仮設防護柵の設置状況、及び道路通行車両や建設重機など現地特有の振動源（ノイズ）と現地に設置された仮設防護柵特有の振動特性を確認する。

3.2.2 実験地の概要

(1) 木製横矢板を用いた仮設防護柵

- ◆ 路線名　　：国道 462 号線（片側 1 車線）
- ◆ 場所　　：群馬県藤岡市坂原地内
- ◆ 所管、連絡先：群馬県西部県民局藤岡土木事務所
- ◆ 仮設防護柵の状況：
  - ・ 法面対策工事に伴う交通への落石・飛石防止のため、道路中央線に沿って設置された一時的な防護柵である。
  - ・ 支柱はH形鋼（H-200）で高さ 4m、横桁（等辺山形鋼 L-75）3 段にて連結されている。基礎構造はコンクリートブロック（600×600×800mm）を使用し、根入れ長は 500mm である。木製横矢板は再利用品であり、幅：150～300mm、厚み 35～40mm と寸法は様々である。支柱間隔 2m にて計 26 スパン設置されている（写真 3.7、3.8)。
  - ・ 木製横矢板は、縦つなぎ木材及び H 形鋼フランジとの間に挿入された木製キャンバーにて固定されている（写真 3.9)。
  - ・ 工事中は片側交互通行となっている。山間部であるが比較的通過車両は多い。路線バス及び工事用ダンプトラック等の大型車両の往来もある。

写真 3.7　木製横矢板を用いた仮設防護柵（前面側）全景

写真 3.8　木製横矢板を用いた仮設防護柵（背面側）全景

写真 3.9　木製横矢板の固定状況

(2) 鋼製横矢板を用いた仮設防護柵

◆ 路線名　　：相模原市道（旧津久井町道）（片側 1 車線）

◆ 場所　　：神奈川県相模原市津久井町青根

（県道 76 号から国道 413 号への側道、横山沢橋付近）

◆ 所管、連絡先：相模原市役所土木部津久井建設課

◆ 仮設防護柵の状況：

・ 当該仮設防護柵は、変状が見られる法枠工斜面下の道路路側帯に設置されており、周囲には不法投棄禁止看板以外の工事看板はなく当面撤去される予定はないと思われる。

・ 支柱は H 形鋼（H-250）で高さ 5m であり、横矢板は軽量鋼矢板（Ⅰ型）である。支柱間隔 2m にて計 7 スパン設置されている（写真 3.10）。

・ H 形鋼ウエブに等辺山形鋼が鉛直方向に溶接されており、軽量鋼矢板は等辺山形鋼とH鋼フランジの間に挿入され全数、等辺山形鋼に溶接されている（写真 3.11）。

・ 支柱根元はコンクリートで固められているが、根入れ長等は不明である。

・ 当該箇所は、幹線道路間の側道なので山間部にしては比較的通過車両は多いが、大型車両の通行はほとんどない。

写真 3.10　鋼製横矢板を用いた仮設防護柵全景

写真 3.11　鋼製横矢板の固定状況

3.2.3　実験計画

(1) 土木研究所構内の仮設防護柵と現地基礎実験の仮設防護柵の振動特性の比較

衝撃エネルギーを明確にした振り子方式衝撃実験を土木研究所構内の実験と同じ条件で実施する。確認内容及び数量は、以下の項目を踏まえ必要最低限とする。

- 衝撃対象部材　：支柱と横矢板の 2 種類とする。
- 衝撃位置　　：高さ方向は「横矢板最下段」、「下から 4 段目」、「下から 7 段目」の 3 ケース、延長方向は「支柱」、「矢板左端部」、「矢板中央」、「矢板右端部」の 4 ケースとする。
- 衝撃エネルギー：矢板中央のみ鉄球質量 1.0、2.0、4.0kg の 3 ケース、他は全て 2.0kg とする。
- 振動計設置高さ：地面から「4 分の 1 高さ」、「2 分の 1 高さ」、「4 分の 3 高さ」の 3 ケースとする。
  ※加速度計は「2 分の 1 高さ」のみとする
- 振動計設置位置：計器設置時のメンテナンス等を考慮し斜面側（背面側）に設置する。ただし、土木研究所構内の基礎実験との比較のため、代表的な衝撃パターン（矢板最下段、中央部及び H 形鋼材最下段、鉄球質量 2.0kg）のみについて、道路側（前面側）設置の場合の振動測定を行う。
- 振動測定方向：加速度型振動計は図 3.3 と同じように 3 成分で防護柵高さの 2 分の 1 に 1 箇所とする。速度型振動計は矢板面に垂直方向の 1 成分のみで、下図のとおり 3 箇所とする。

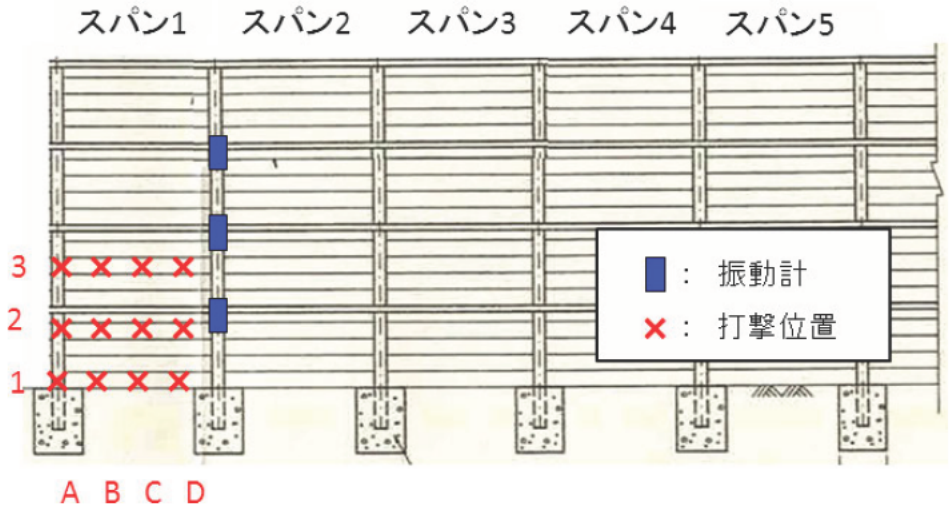


図 3.31　土木研究所構内の実験との比較実験概要図

(2) 現地基礎実験の仮設防護柵の振動特性の把握

①長スパン（3 スパン以上）の仮設防護柵の振動特性実験

土木研究所構内の実験では確認できなかった延長方向が 3 スパン以上の仮設防護柵の振動特性を把握することを念頭に置いた各種実験を実施する。確認項目や使用機材は（1）に準拠する。鉄球質量は、土木研究所構内の実験で標準質量とした 2.0kg とする。

（衝撃対象箇所と振動測定位置の組合せ）

・ パターン 1：仮設防護柵の延長方向中央付近のスパンとしを対象とし、振動測定位置は、(1) と同様の位置で測定する。（1）の実験と振動特性を比較することにより長スパンの仮設防護柵の中央部に鉄球が衝突した場合の振動特性を確認する。

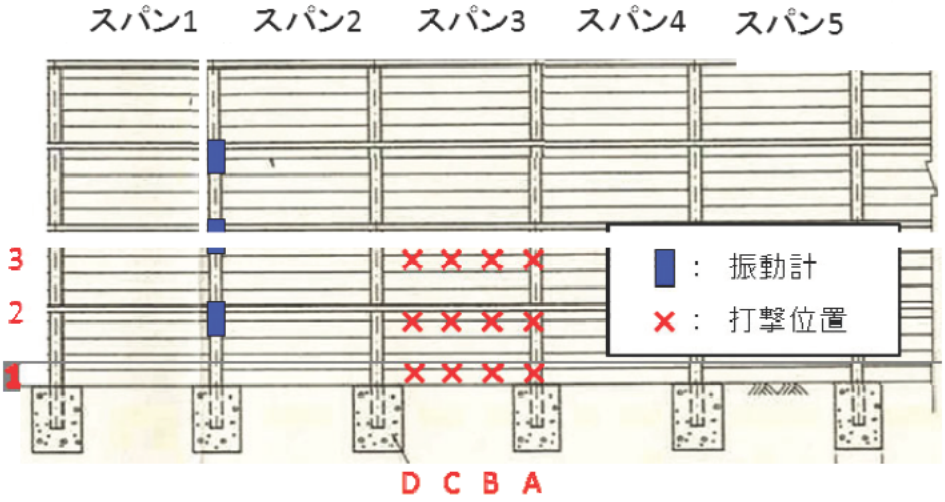


図 3.32　パターン 1 の実験概要図

・ パターン 2 : 衝撃対象箇所を振動測定位置から 1 スパンずつ離して実施する。このことにより、振動計の設置位置から数スパン離れた位置に鉄球が衝突した場合の振動特性を確認する。実施スパン数は振幅の減衰状況を考慮し現地で決定する。

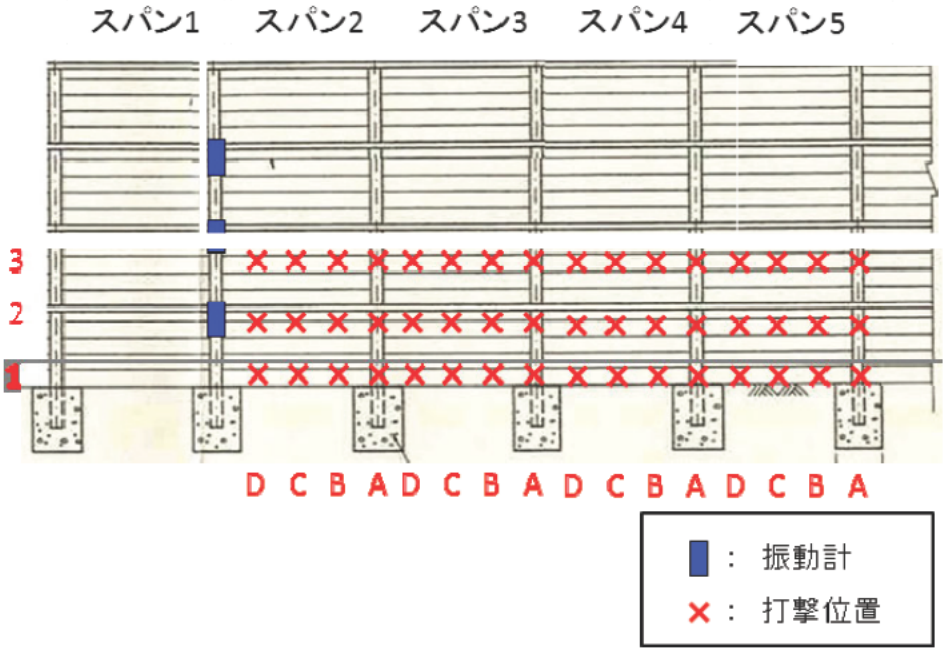


図 3.33　パターン 2 の実験概要図

②現地特有の振動源（ノイズ）に関する振動特性の実験

道路通行車両のうち代表的な車両（乗用車、ダンプ、バスなど）や建設重機を振動源とした振動を測定する。振動計設置位置は（1）に準じる。

(3) 傾斜台を用いた玉石の衝撃実験

仮設材を使用して簡易な傾斜台を現地に設営し、数種類の質量の玉石（0.25、0.5、1.0、2.0、4.0、6.0kg）を傾斜台から防護柵（最下段）に転落させ、衝撃時の振動を測定する。また、玉石の落下状況をビデオカメラで撮影する。実施スパン数は、下図を基本とし、振幅の減衰状況を考慮し現地で決定する。

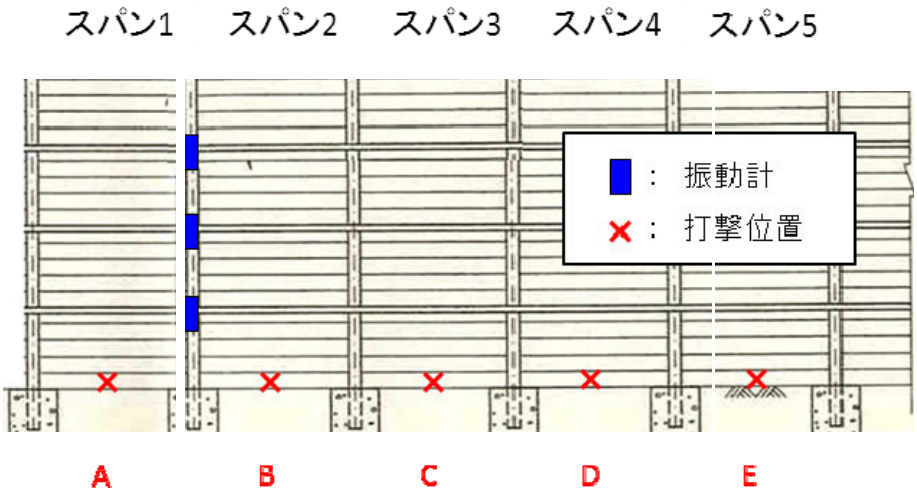


図 3.34　傾斜台を用いた衝撃実験の概要図

(4) 実験の留意事項

現地特有の振動源（ノイズ）に関する実験以外は、仮設防護柵を対象とした振動測定の際は、交通車両の振動がノイズとして入らないようにする。

また、交通振動の測定は、複数の通過車両があると車種による波形区別がつきにくいので、単独通行に限り実施する。見張り員を配置し、通行する車両を確認し測定班に合図する。

3.2.4　実験結果 1（木製横矢板）

(1)　速度型振動計による実験結果

① 速度型振動計の設置場所

図 3.35 は、速度型振動計を設置した場所である。

H 形鋼の「H-2」では、道路側と斜面側に設置し、「H-6」では斜面側に設置した。

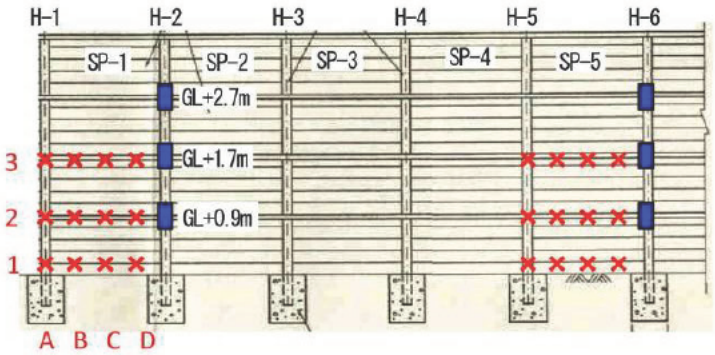


図 3.35　速度型振動計を設置した場所

② 自動車走行振動

図 3.36 は、自動車走行振動による代表波形であり、図 3.37 は、自動車走行振動の測定結果である。速度型振動計による自動車走行振動の特徴（振幅、周波数）を以下にまとめた。

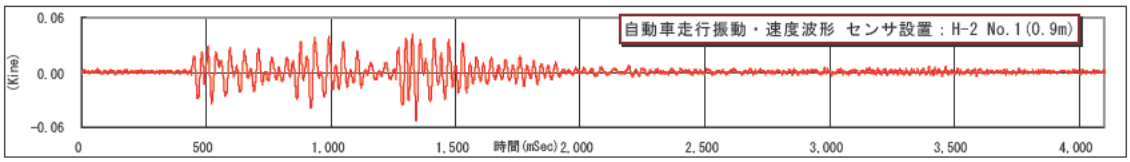


図 3.36　速度型振動計による自動車走行振動の例［3 台連続して通過した時の波形］

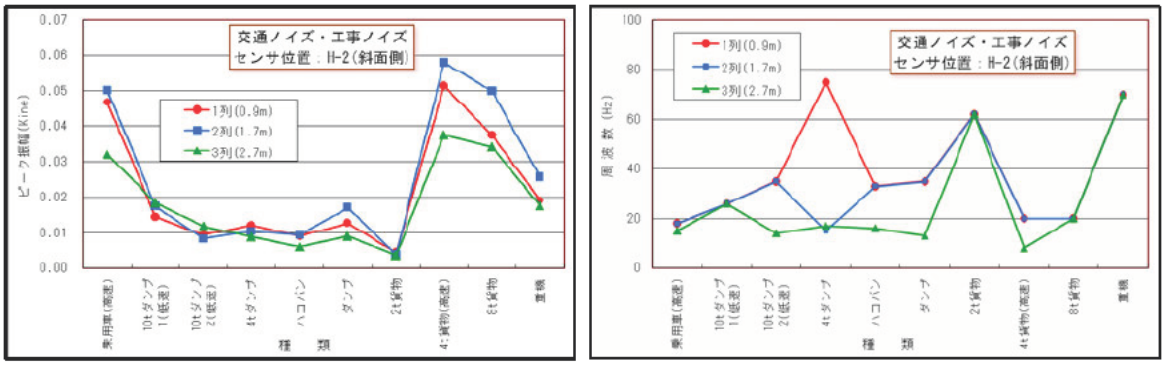


図 3.37　速度型振動計による自動車走行振動の測定結果（左振幅、右周波数）

- 検知センサーの位置No.2（G=1.7m）付近の振動が、最も大きくなる傾向がある。
- 最も大きな振動は4t貨物車が高速度で通行した際の0.06Kine（60mkine）であった。

- 一方、車両重量の小さな乗用車であっても高速度で走行する際には、0.05Kine程度（50mKine）という大きな振動が発生していることも判明した。
- 比較的低速度で走行した10tonダンプカーを2台測定したが，振幅値で約2倍の差が見られた。走行速度あるいは積載条件による違いと思われるが、詳細は不明である。
- 車両重量にかかわらず、低速で走行する場合の走行振動は、概ね0.01Kine（10mKine）前後であった。
- 走行時の周波数は概ね40Hzより低いようであるが、中には60Hzを超える走行振動も検出されている。

図 3.38 は、自動車走行振動の振幅と周波数の関係グラフである。

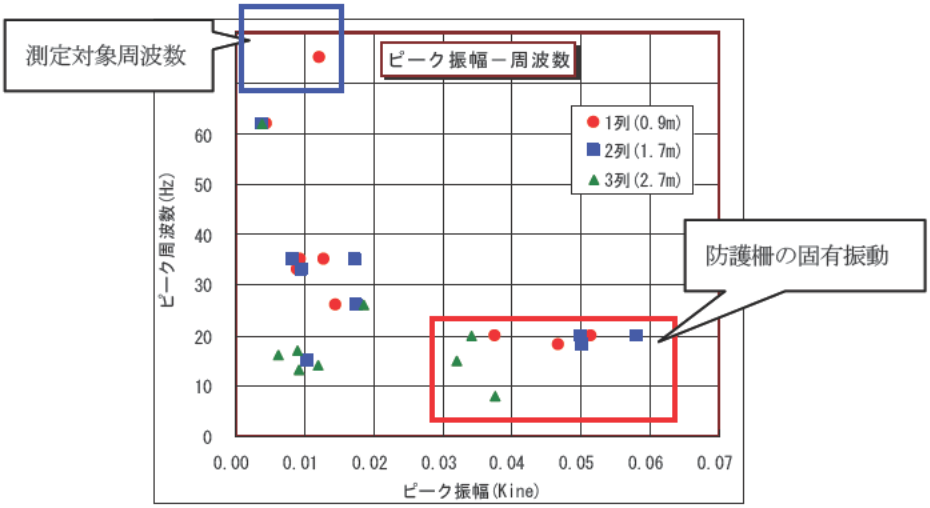


図 3.38　自動車走行振動のピーク振幅とピーク周波数の関係

- ピーク振幅が0.03Kineより大きな交通振動では、ピーク周波数が20Hzより低くなる傾向が見られるが，これは、土木研究所構内の木製横矢板での実験結果グラフの図3.9と図3.11に表れている防護柵（H形鋼や木製横矢板）の固有振動と同じものであると考えられる。
- 土木研究所構内での実験結果から、測定すべき周波数帯を70Hz～300Hzと提案したが、このような高周波数帯（多少前後含む）を使用する場合、自動車走行振動のピーク振幅は概ね「0.01Kine（10mkine)」以下と予想される。

③ 周波数特性

（ｉ）衝撃方向、スパン及び対象による比較：鉄球

図 3.39 は、速度型振動計を「H-2」支柱の No.2（GL+1.7m）の道路側と斜面側、及び「H-6」支柱の No.2（GL+1.7m）の斜面側に設置し、鉄球の衝撃位置を「SP-1 の 3 段目（3-B)」とした時の波形スペクトルに、土木研究所構内で測定したスペクトルを重ね合わせたものである。

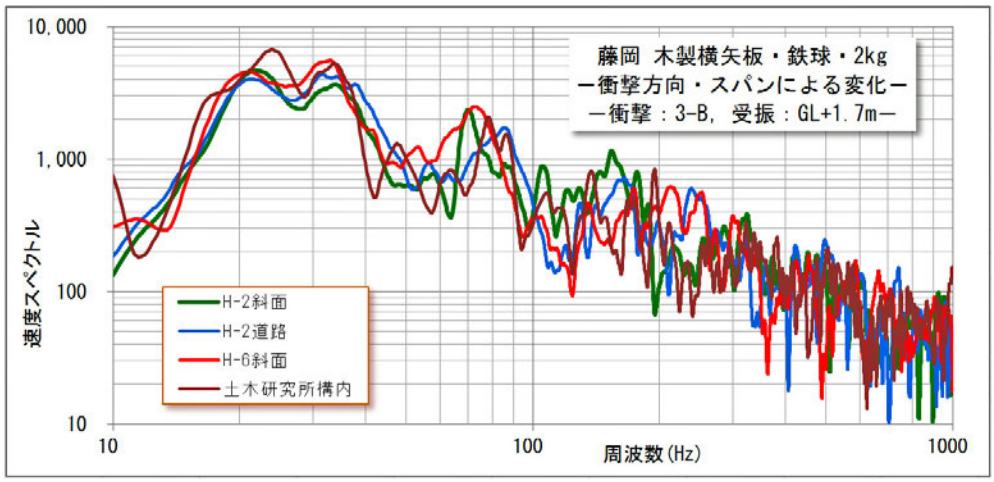


図 3.39　鉄球の衝撃方向、スパンや対象による速度スペクトルの例

- いずれのスペクトルも、ほぼ同一であると言って良い。
- 60Hz以下の低周波数の成分波は、仮設防護柵の固有振動である。
- 150Hz付近の成分波は、鉄球の衝撃振動であるため、これを計測対象とする。

（ii）受振位置の比較：鉄球、玉石

図 3.40 は、鉄球を「SP-1 の 3-B」に衝撃を与えた時に発生した衝撃振動を、3 箇所の速度型振動計で同時に測定した振動波形の速度スペクトルである。

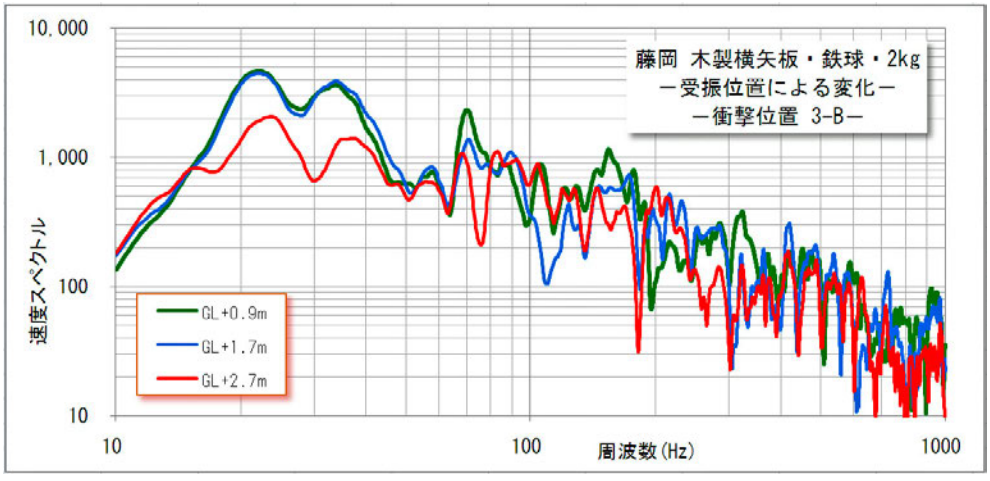


図 3.40　鉄球衝撃時の速度スペクトルと受振点位置

・ 振幅の違いはあるものの、3箇所の受振点の速度スペクトルに大きな違いは見られないので、基本的にどの位置に速度型振動計を設置しても大差はないことが確認できた。

図 3.41 は、質量 1.1kg の玉石が木製横矢板に衝突した際に発生した振動を、3 箇所の受振点で同時に測定した振動波形の速度スペクトルである。

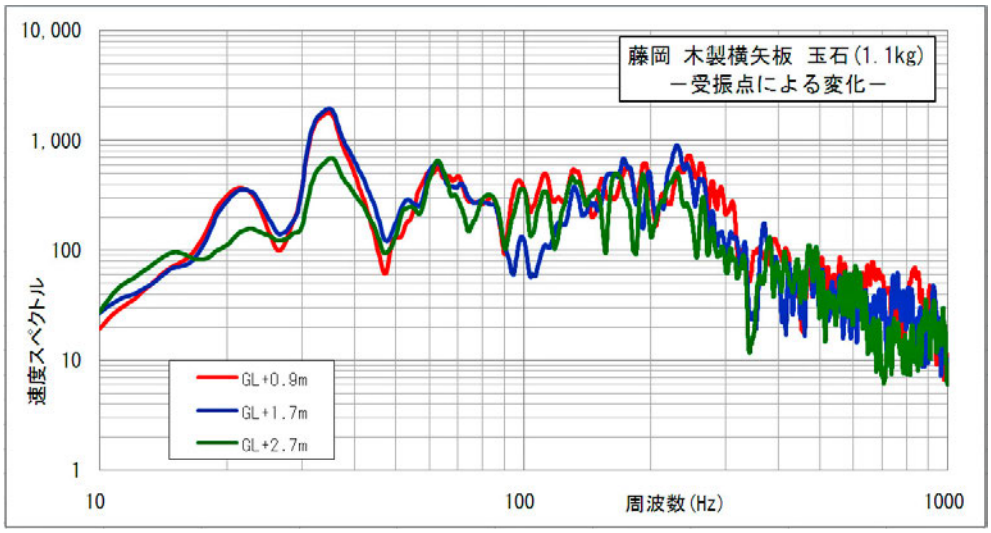


図 3.41　玉石衝突時の速度スペクトルと受振点位置

・一部の周波数帯の振幅に多少の違いはあるものの、3箇所の受振点の速度スペクトルに大きな違いは見られないので、基本的にどの位置に速度型振動計を設置しても大差はない、ことが確認できた。
・玉石の衝突による振動のピーク周波数は230Hz前後と、鉄球衝撃より若干高い結果が得られた。

（iii）衝撃距離による比較と交通振動の影響：鉄球、玉石＞

図 3.42 は、鉄球を「SP-1」、「SP-3」及び「SP-5」の「3-B」に衝撃を与えた時に発生した衝撃振動を「H-2 の No.2（GL+1.7m）」で受振した振動波形の速度スペクトルに、最も振幅が大きかった「高速 4ton トラック」の走行振動のスペクトルを重ね合わせたものである。

・自動車走行時に仮設防護柵の自由振動が、かなり大きく発生していることが確認できた。
・土木研究所構内実験では、測定する周波数帯を「70Hz～300Hz」としたが、自動車走・行振動には90Hz付近にかなり大きなピークが存在しており、この周波数帯も除去すべきであることが判明したため、測定する周波数帯を「200Hz～600Hz」に変更することにした。

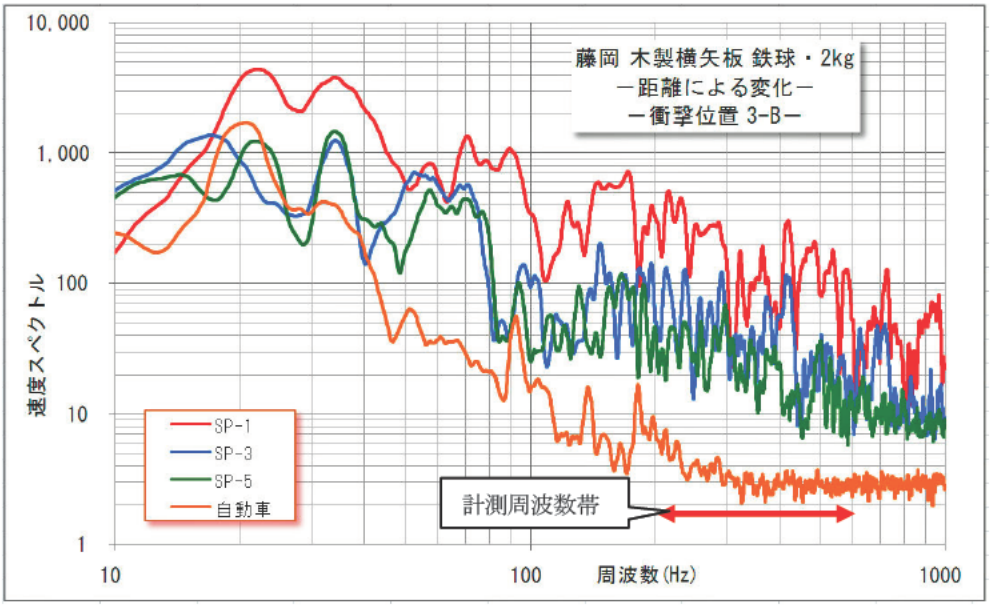


図 3.42　スパン位置による鉄球衝撃振動と自動車走行振動の速度スペクトル

図 3.43 は、玉石を「SP-1」、「SP-3」及び「SP-5」でそれぞれ木製横矢板に衝突させた時に発生した振動が「H-2 の No.2（GL+1.7m）」に伝搬した振動波形の速度スペクトルに、最も振幅が大きかった「高速 4ton トラック」の走行振動のスペクトルを重ね合わせたものである。

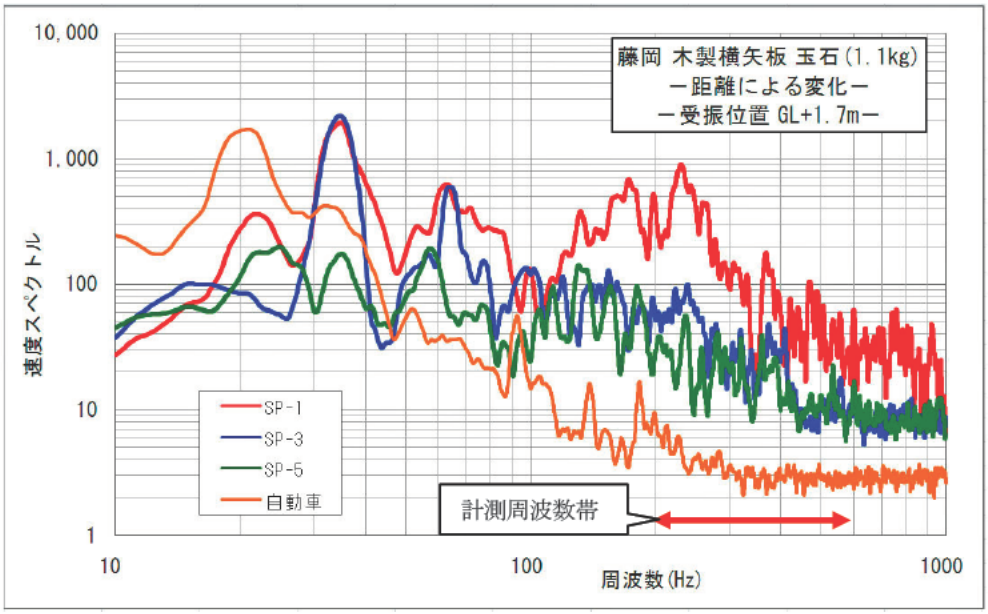


図 3.43　スパン位置別の玉石の衝撃による振動と自動車走行振動の速度スペクトル

・ 「SP-5」の場合，玉石の衝撃振動の振幅と、自動車走行時に検出された90Hzのピーク振動との振幅比は約2倍程度と、かなり接近しているようである。

・ 実際の落石による衝撃振動は、玉石による衝突振動に近いと思われるので、検知システム（測定器）においてこの成分波を除去するために「200Hz～600Hz」のバンドパスフィルターを使用することにした。

④ 振幅特性

（ｉ）鉄球による速度波形

図 3.44 は、鉄球を「SP-1 の 2-C」と「SP-5 の 2-C」に衝撃を与えた時に発生した振動波形の例である。

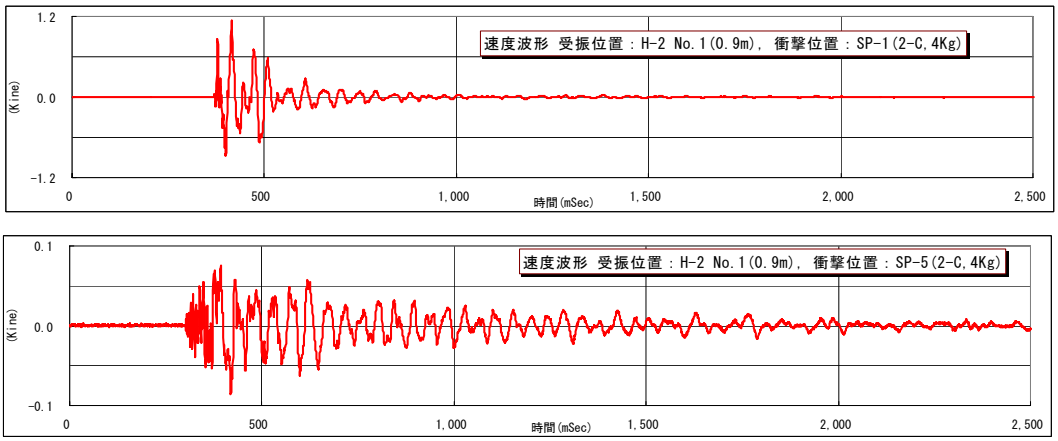
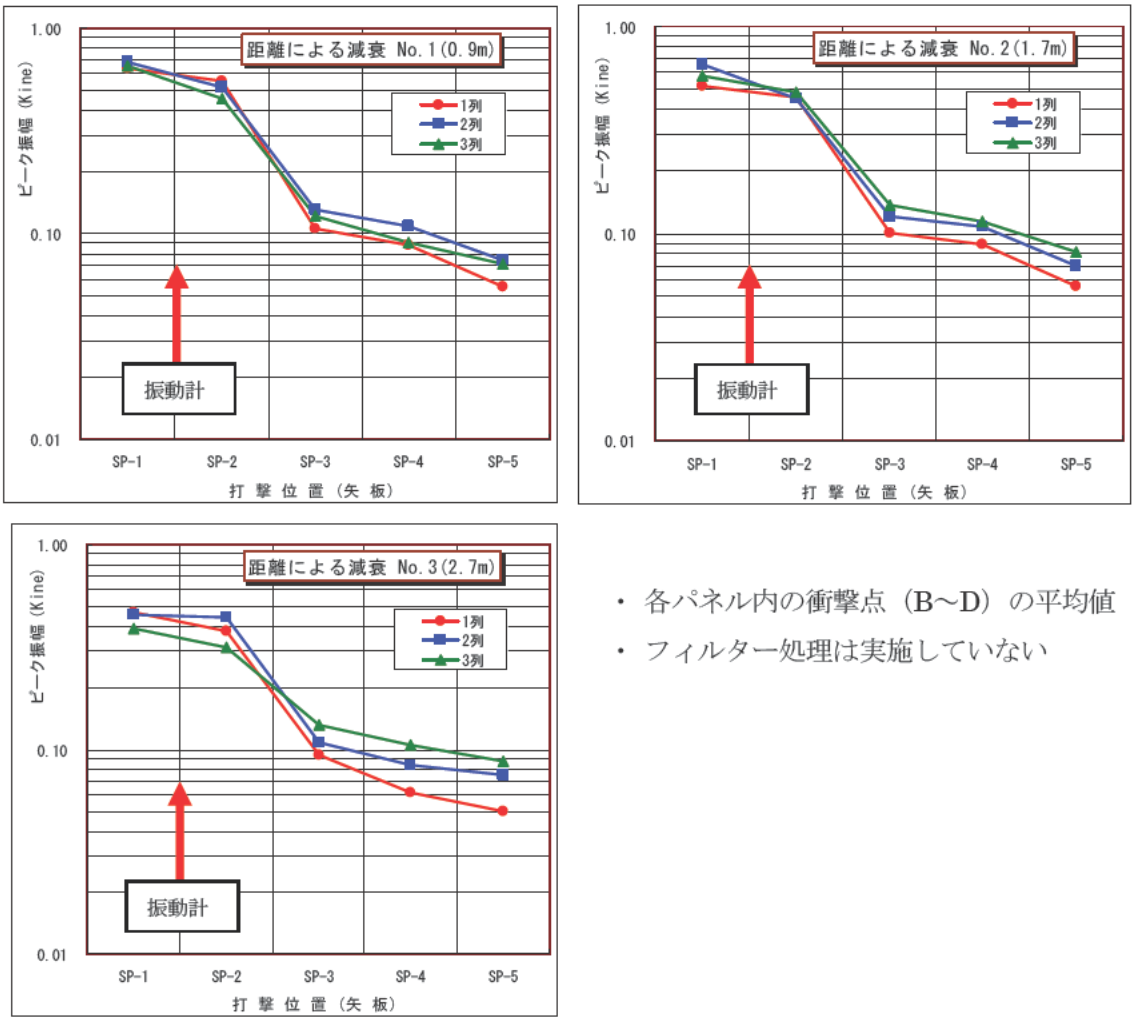


図 3.44　鉄球による速度波形（例）

（ii）距離減衰（スパン）：鉄球

図 3.45 は、質量 2kg の鉄球の衝撃した位置（スパン）とピーク速度振幅の関係を示した。



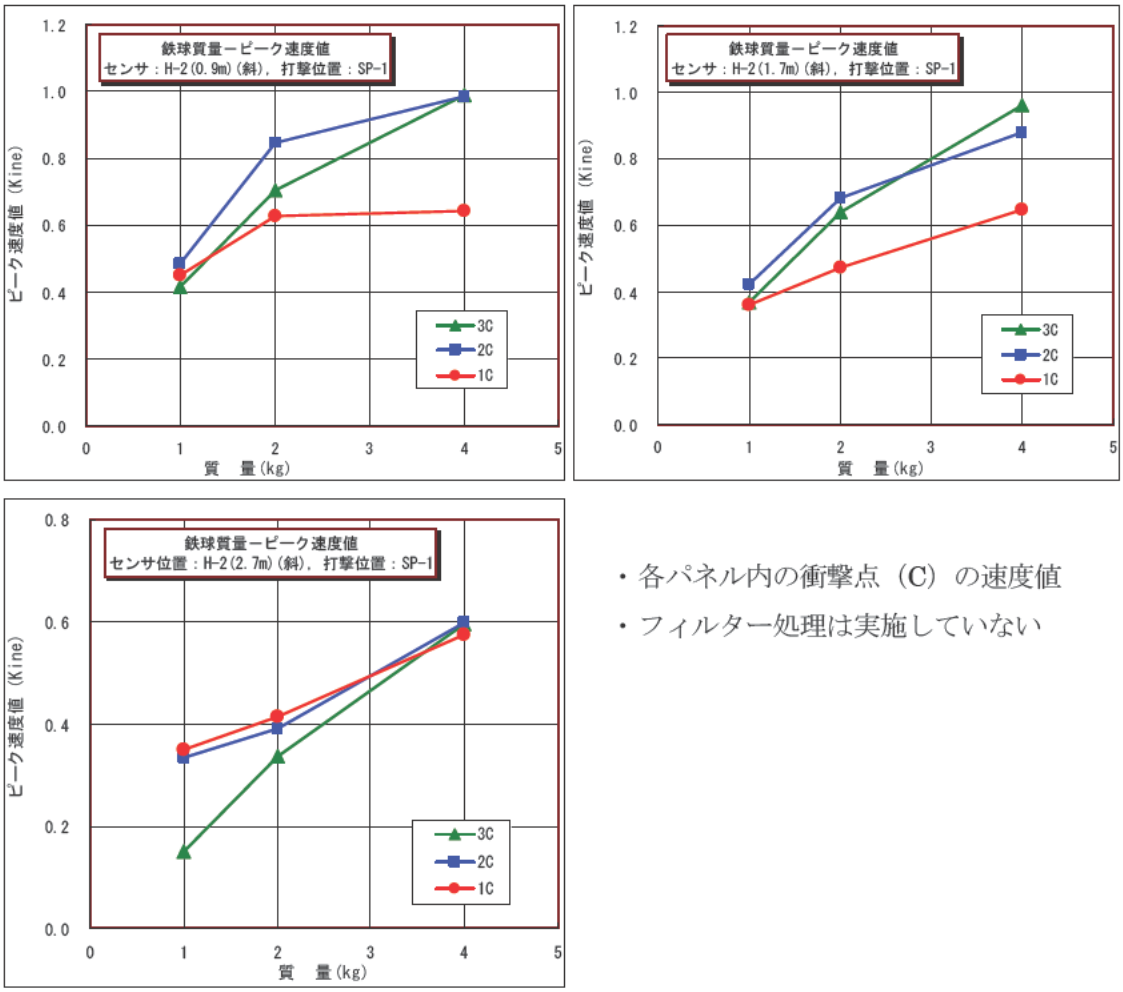
- 各パネル内の衝撃点（B～D）の平均値
- フィルター処理は実施していない

図 3.45 鉄球の衝撃位置（スパン）とピーク振幅（3 箇所の平均値）の関係

- 速度型振動計を「SP-1」と「SP-3」の中間に位置する「H-2」に設置し、衝撃を「SP-1」から「SP-5」で実施した時のピーク振幅の平均値である。
- 「SP-1」と「SP-2」は速度型振動計の左右に位置しているが、解放端のある「SP-1」での衝撃振幅が相対的に大きい結果が得られた。
- 「SP-2」に比べ,「SP-3」のピーク振幅は約1/4程度と、急激に減衰する傾向を示しているが、「SP-3」以遠での減衰の程度はそれ程大きくない。
- 「SP-3」のパネルに使用した木製横矢板や左右のH形鋼の設置状況が左右の木製横矢板や設置状況に比べて異なっていたため、衝撃応答の性質が異なっていた可能性がある。今後類似した実験を実施した場合に、その測定結果により評価する必要がある。

（iii）質量と速度振幅：鉄球

図 3.46 は、鉄球の質量と速度振幅の関係をまとめたものである。



・各パネル内の衝撃点（C）の速度値

・フィルター処理は実施していない

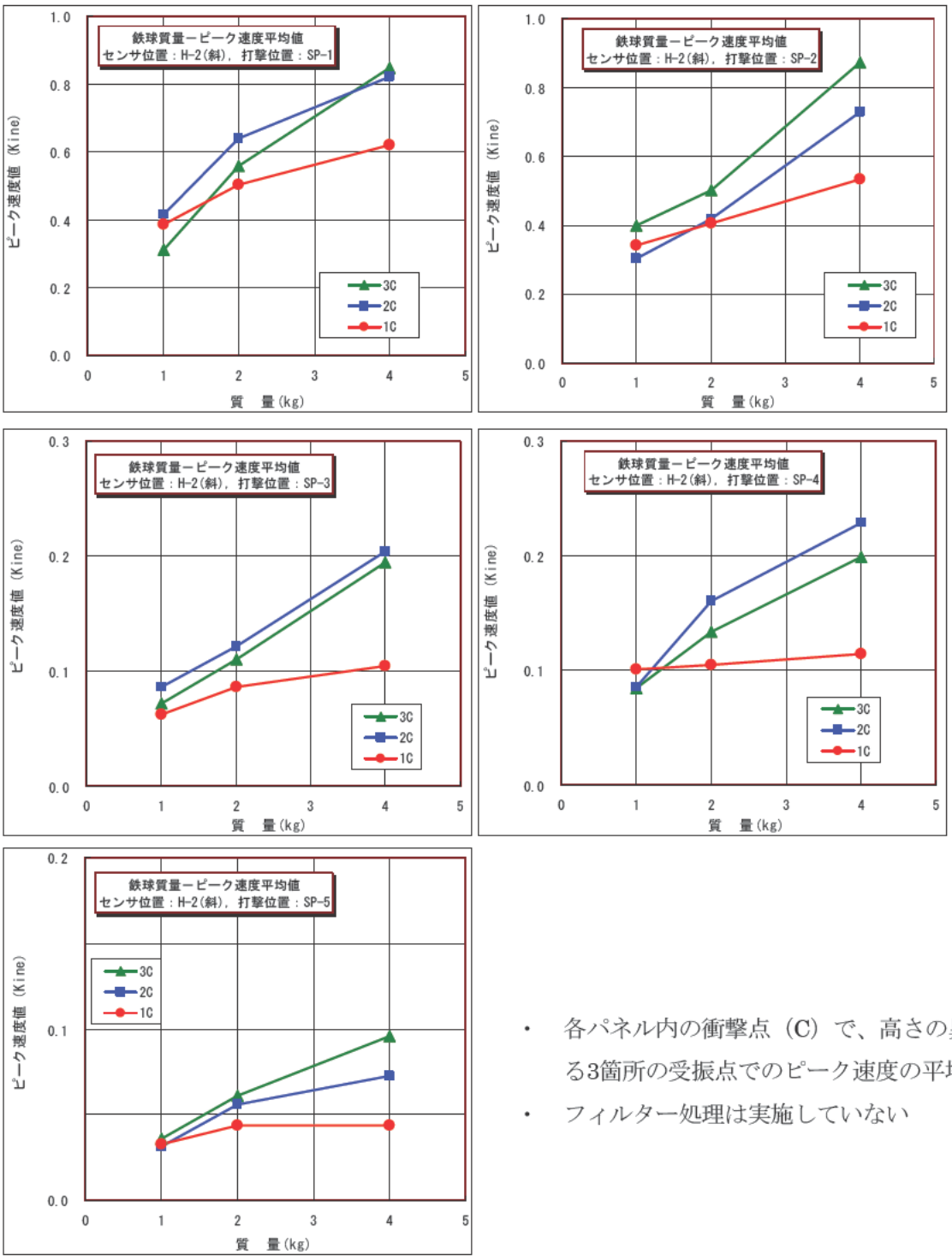
図 3.46　鉄球質量とピーク振幅（平均値）の関係

- 速度型振動計の高さが「GL+0.9m」でかつ衝撃点が「1-C」の場合を除いて、鉄球質量と速度振幅の間には、概ね正の相関がある傾向がみられる。
- 衝撃点が「1-C」の場合は、GL+1.7mとGL+2.7mの受振点のいずれも、鉄球質量～速度振幅の関係式の傾斜（α）は緩やかである、という傾向が見られる。
- 鉄球質量が4kgの場合では、ピーク幅値は概ね0.6Kine～1.0Kineであった。しかるに、図3.12に示した土木研究所構内での木製横矢板でのピーク振幅値は1.5Kine(1,500mKine)～2.6Kine(2,600mKine)であり、両者には3倍程度という大きな違いが存在している（倍率は目安）。理由として、土木研究所構内の場合は、木製横矢板と鋼製横矢板が接して設置されているために鋼製横矢板が木製横矢板に影響を与えること、あるいは、土木研究所構内の場合、木製横矢板と鋼製横矢板が共に1スパンしか無いので、衝撃によ

る振動が逸散しないこと、のどちらかが考えられる。

（iv）質量、衝撃位置（スパン）と速度振幅：鉄球

図 3.47 は、鉄球の質量と衝撃位置（スパン）に対する速度振幅の関係である。



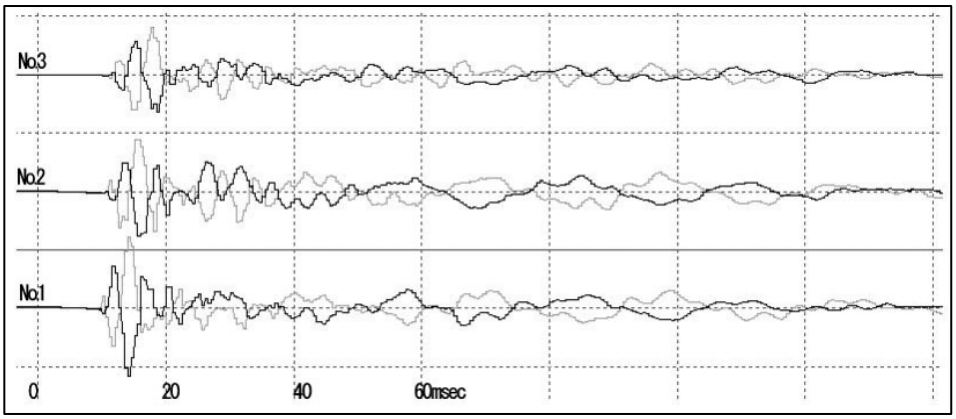
- 各パネル内の衝撃点（C）で、高さの異なる3箇所の受振点でのピーク速度の平均値
- フィルター処理は実施していない

図 3.47 衝撃位置（スパン） に着目した鉄球の質量と速度ピーク振幅の関係

・ 衝撃点が地表に最も近い「1-C」では、鉄球質量～ピーク速度振幅値（平均）関係式の傾斜がもっとも緩やかである。
・ これは、一番下の木製横矢板が地中に接しているため、一種の制振あるいは防振の作用が発生しているものと考えられる。
・ 衝撃点が遠くなるにつれ、鉄球質量～ピーク速度振幅値（平均）関係式の傾斜が緩くなる傾向が見られる。
・ 衝撃高さと衝撃スパンによって傾斜係数（α）が変わる可能性が高いので、鉄球質量～ピーク速度振幅値（平均）の関係式を求めるには十分な留意が必要である。

（ｖ）速度型振動計の設置位置：鉄球

図 3.48 は、速度型振動計を「H-2」の道路側と斜面側に設置した時の測定結果例である。



濃色：速度型振動計を H-2 の斜面側に設置　薄色：速度型振動計を H-2 の道路側に設置

個別に計測した結果を合成しているので、厳密な比較はできない

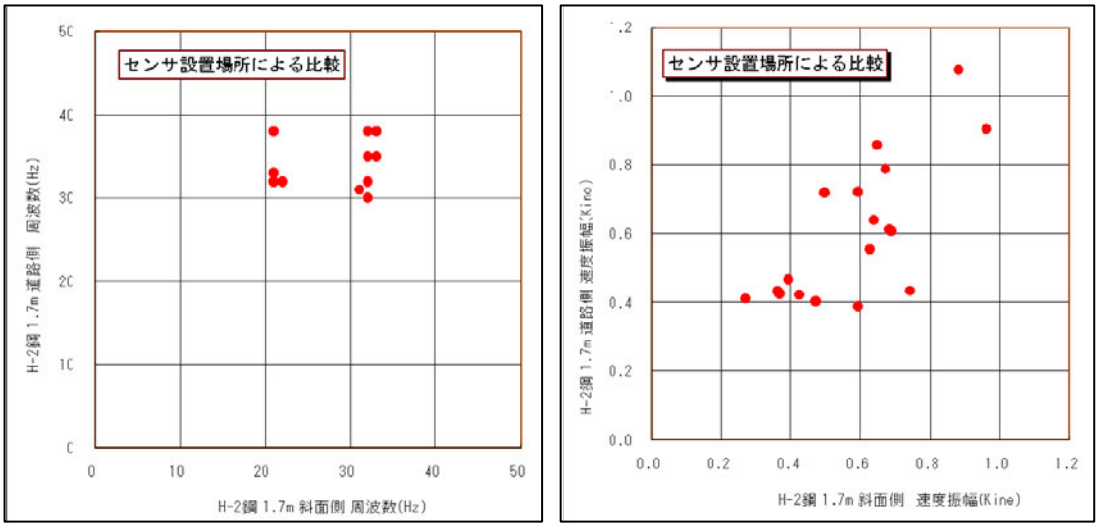


図 3.48　No.2 速度型振動計（GL+1.7m）の設置位置による速度振幅と周波数の関係

・ 同一の衝撃振動による比較ではないので厳密ではないが、波形や代表グラフで評価する限り、速度型振動計をH形鋼の道路側あるいは斜面側に設置しても、結果は殆ど変わらない、と考えてられる。

（vi）すべり台＋玉石による速度波形

図 3.49 は、質量 1.85kg の玉石を傾斜台を使用して「SP-1」と「SP-5」に衝突させた時の振動波形である。

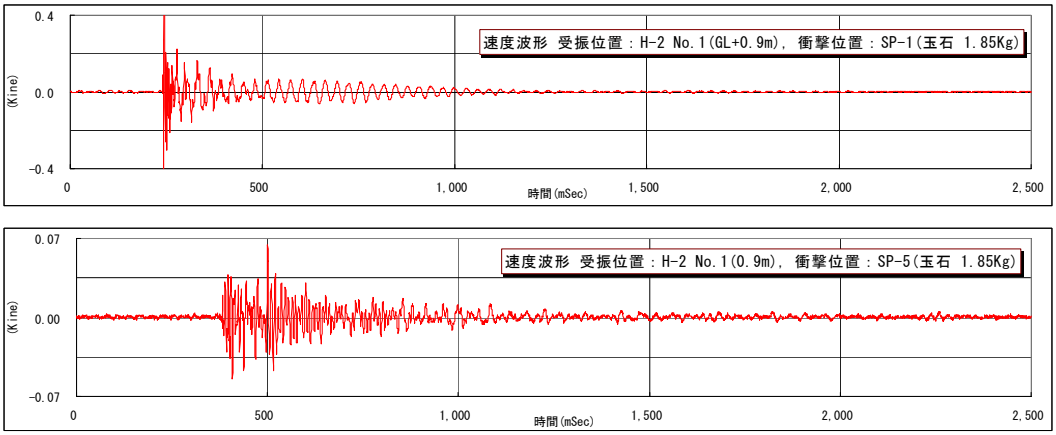
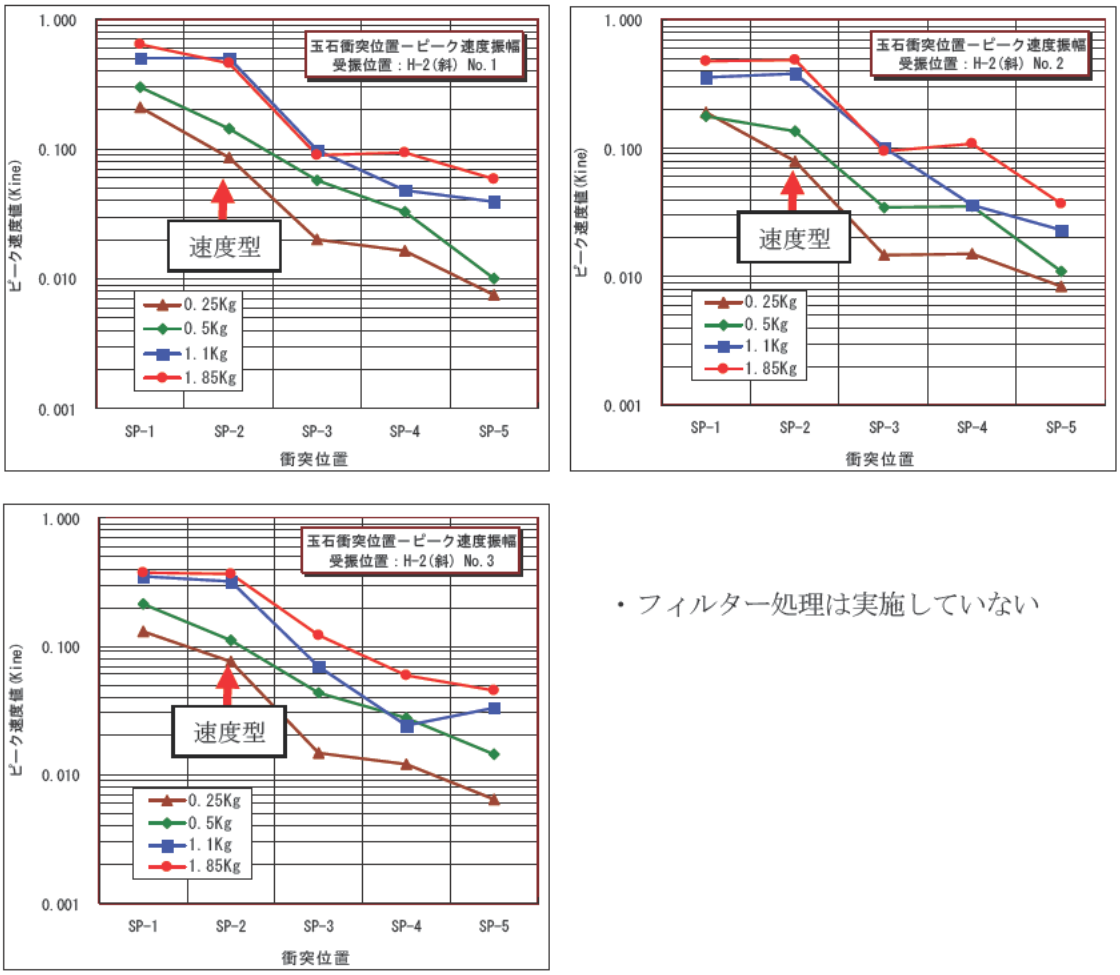


図 3.49　傾斜台＋玉石による速度波形（例）

（vii）距離減衰（スパン）：玉石

図 3.50 は、玉石の衝突位置（スパン）とピーク速度振幅の関係である。



・フィルター処理は実施していない

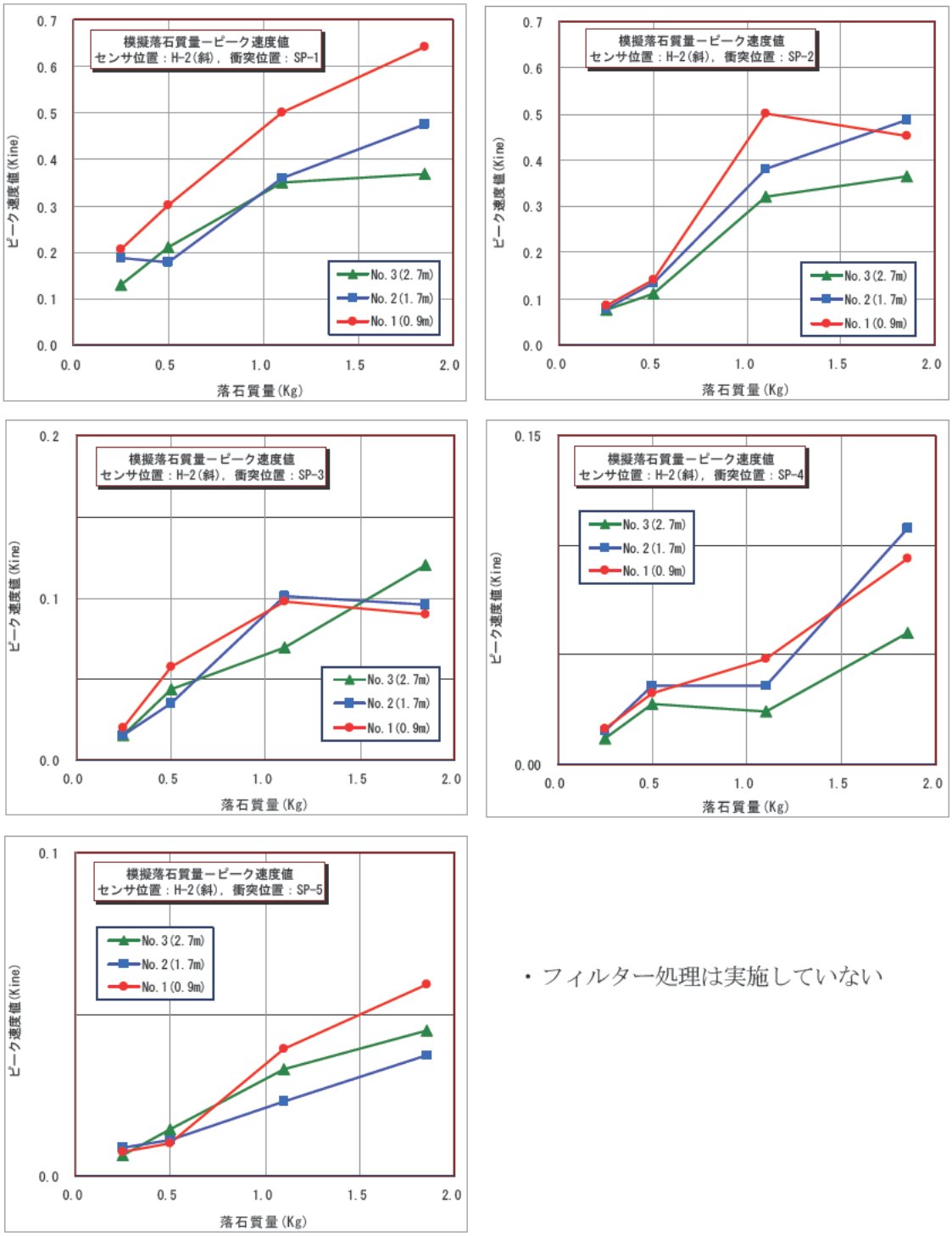
図 3.50 玉石の衝突位置（スパン）と速度平均振幅の関係

- 速度型振動計を「SP-1」と「SP-3」の中間に位置する「H-2」に設置し、衝撃を「SP-1」から「SP-5」に与えた時のピーク振幅の平均値である。
- 一部の例外を除いて、解放端のある「SP-1」の方が「SP-2」より速度振幅のピーク値は大きい。
- 鉄球での結果と同様に、「SP-3」で発生する振動のピーク振幅は、左右のスパンよりも低くなる傾向が見られる。防護柵の設置状況や「SP-3」に使用されている木製横矢板の動的常数が異なっている可能性がある。
- 自動車走行時の振動は，概ね0.01Kine以下であることが判明しているが、これはノイズ除去用のフィルターを通していない場合であって、測定帯域を「200Hz～600Hz」とするバンドパスフィルターを使用する場合には、0.01Kineよりかなり小さくなることが期待される。よって、質量が0.3Kg程度の玉石が4スパン程度離れた木製横矢板に

衝突しても、これによる振動をトリガー検出できる可能性が考えられる。

（viii）質量、衝撃位置（スパン）と速度振幅その 3：玉石

図 3.51 は、玉石の質量と衝撃位置（スパン）に対する速度振幅の関係である。



・フィルター処理は実施していない

図 3.51 衝撃スパンごとにまとめた玉石の質量と速度ピーク振幅の関係

・ 衝撃点が遠くなるにつれ、鉄球質量～ピーク速度振幅値（平均）関係式の傾斜が緩くなる傾向が見られる。
・ 衝撃高さと衝撃スパンによって傾斜係数（α）が変わる可能性が高いので、鉄球質量～ピーク速度振幅値（平均）の関係式を求めるには十分な留意が必要である。

⑥ まとめ

藤岡市内の木製横矢板の仮設防護柵における実験の結果から、得られた知見などを以下にまとめた。

＜周波数特性＞

・ 土木研究所構内の仮設防護柵と、藤岡市内の仮設防護柵の周波数特性は大差がなかった。
・ どちらの仮設防護柵も、60Hz以下、特に20Hz～40Hzに固有振動が大きく検出されている。
・ 交通振動のピーク周波数も60Hz以下であるため、交通によって木製横矢板の固有振動（自由振動）が励起されたと考えられる。
・ 以上の結果から、木製横矢板では、計測の対象周波数を例えば「200Hz～600Hz」といった設定にすべきであると考えている。

＜振幅特性＞

・ 土木研究所構内での木製横矢板と藤岡市内の木製横矢板では、ピーク振幅値に比較的大きな差が見られた。
・ 鉄球，玉石とも、衝撃スパン位置が遠くなるほど、振動のピーク振幅は減衰し、実用上4ないし5スパン程度が限界になる可能性がある。
・ 3スパンないし4スパン程度離れた場所では、衝撃質量（エネルギー）とピークエネルギーの関係式の傾斜が、緩やかになる傾向が見られる。
・ 自動車走行時の振動は、概ね0.01Kine以下であることが判明しているが、これはノイズ除去用のフィルターを通していない場合であって、測定帯域を「200Hz～600Hz」とするようなバンドパスフィルターを使用する場合には、0.01Kineよりかなり小さくなることが期待される。よって、質量が0.3kg程度の玉石が4スパン程度離れた木製横矢板に衝突しても、これによる振動をトリガー検出できる可能性が考えられる。

(2) 加速度型振動計による実験結果

①周波数特性

周波数特性に関しては、以下の観点で加速度応答スペクトルの比較を行った。

（ｉ）土木研究所構内と現地の比較：地盤条件、構造の違い

（ii）衝撃材料の比較：鉄球、玉石

（iii）衝撃スパンの位置（距離）の比較：振動計取り付け位置のH形鋼から最大 4 スパン

（iv）振動計取り付け位置の比較：防護柵延長方向端部の斜面側、防護柵延長方向内部（端部から 5 スパン）斜面側、防護柵延長方向端部道路側の 3 箇所

（ｖ）振動源の比較：鉄球衝撃、交通振動

加速度応答スペクトルの比較にあたり、上記全ての比較条件を統一した観点で俯瞰するために、以下を基本データとした。

- **振動計設置位置：防護柵延長方向端部の斜面側**
- **衝撃位置：防護柵延長端部（スパン１）の１Ｃ**
- **衝撃材料・質量：鉄球２ｋｇ**

（ｉ）土木研究所構内と現地の比較

図 3.52 は、土木研究所構内と現地（藤岡、木製横矢板）の加速度応答スペクトルを比較した結果である。土木研究所構内の加速度応答スペクトルは比較的低い周波数帯域に分布しているが、現地は 1,000Hz 以上の高い帯域にも分布している。また、測定成分毎のピーク周波数も大きく異なっている。特に矢板水平方向の Y 成分は、土木研究所構内では 250～300Hz 付近にピーク周波数があるが、現地では 1,700Hz 付近にピークが認められる。一方で、矢板上下方向の X 成分については、現地では比較的低い帯域にピークが認められるが、土木研究所構内では明確なピークが認められない。このような周波数特性の違いは、設置場所（地盤条件）や構造に起因していると考えられる。例えば、土木研究所構内の地盤（締め固め度が低い盛り土）であり、現地（藤岡）の地盤に比べて柔らかかったため、Y 成分に見られる高い剛性に起因した 1,000Hz 以上の高い周波数帯域の振動は発生しなかったことが考えられる。

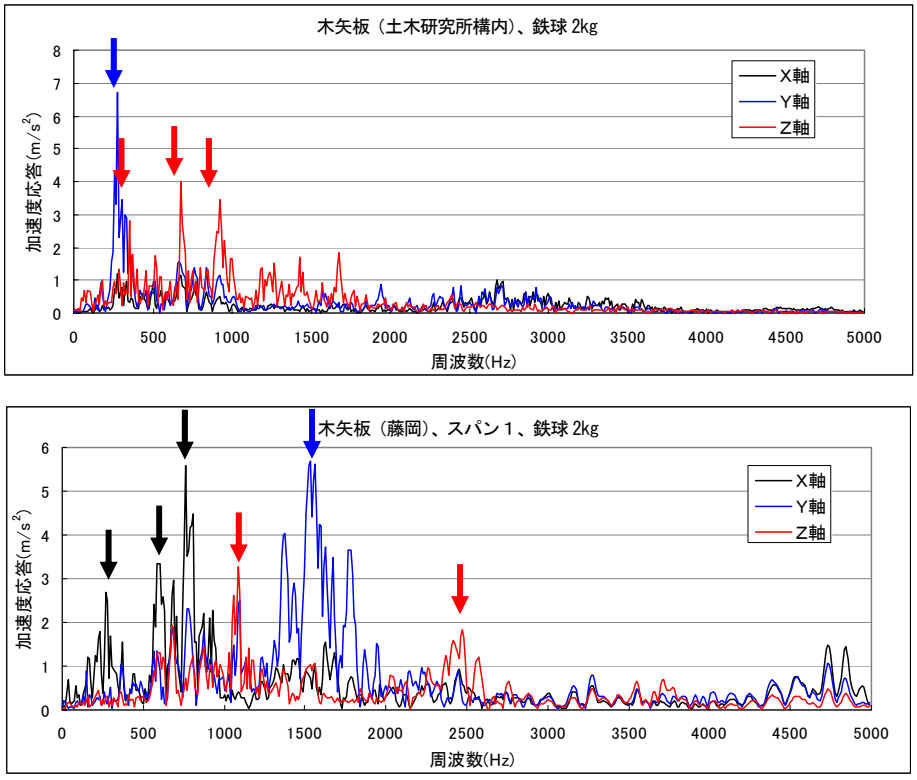


図 3.52　土木研究所構内と現地（藤岡）の加速度応答スペクトルの比較

（ⅱ）衝撃材料の比較：鉄球、玉石

図 3.53 は、鉄球と玉石の加速度応答スペクトルを比較した結果である。衝撃位置のずれ、ノイズの影響により衝撃によって励起されたスペクトルの周波数に若干ばらつきがあり、不明瞭な部分があるものの、概ね卓越スペクトルの傾向は下記のとおり同様であると考える。

・矢板上下方向 X 軸：600～800Hz

・矢板水平方向 Y 軸：1,600～1,800Hz

・矢板垂直方向 Z 軸：2,300～2,500Hz

したがって、衝撃材料の違いは周波数特性に大きく影響しないものと考える。

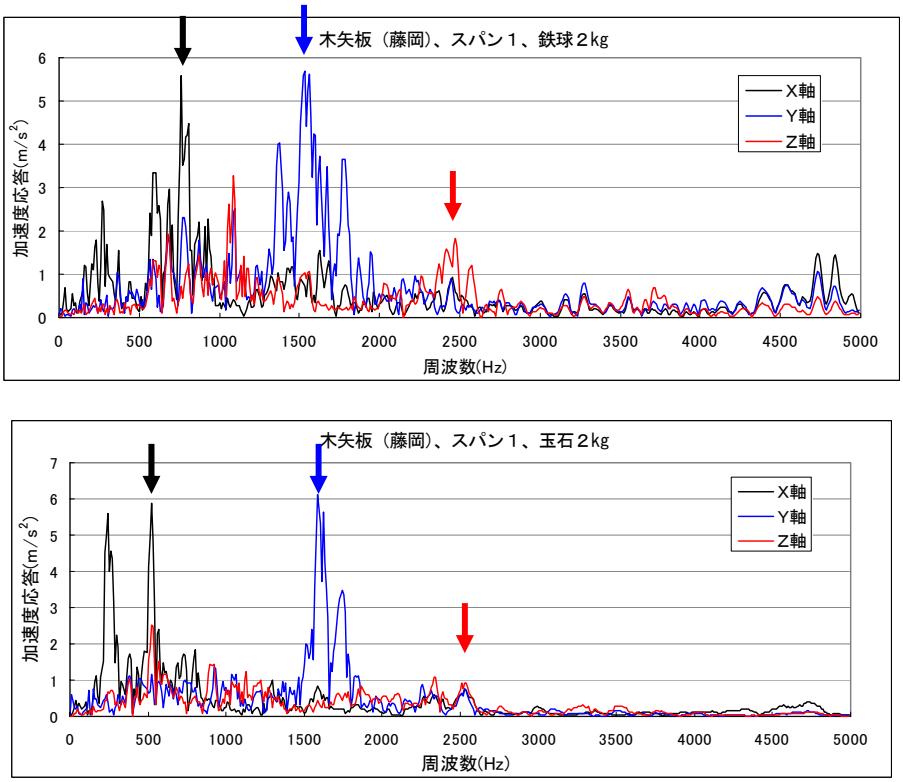


図 3.53　衝撃材料に着目した加速度応答スペクトルの比較（衝撃位置 1C）

（iii）衝撃スパンの位置（距離）の比較

図 3.54 は、防護柵延長端部（スパン 1）から防護柵延長内部（スパン 5）へと、衝撃スパン位置を振動計設置位置から遠ざけた場合の加速度応答スペクトルの比較結果である。衝撃位置のずれ、ノイズの影響により衝撃によって励起されたスペクトルの周波数に若干ばらつきがあるものの、概ね卓越スペクトルの傾向は下記のとおり同様であると考える。

・矢板上下方向 X 軸：600～800Hz

・矢板水平方向 Y 軸：1,600～1,800Hz

・矢板垂直方向 Z 軸：2,300～2,500Hz

このことから、衝撃スパンの位置（距離）は周波数特性に大きく影響しないものと考える。

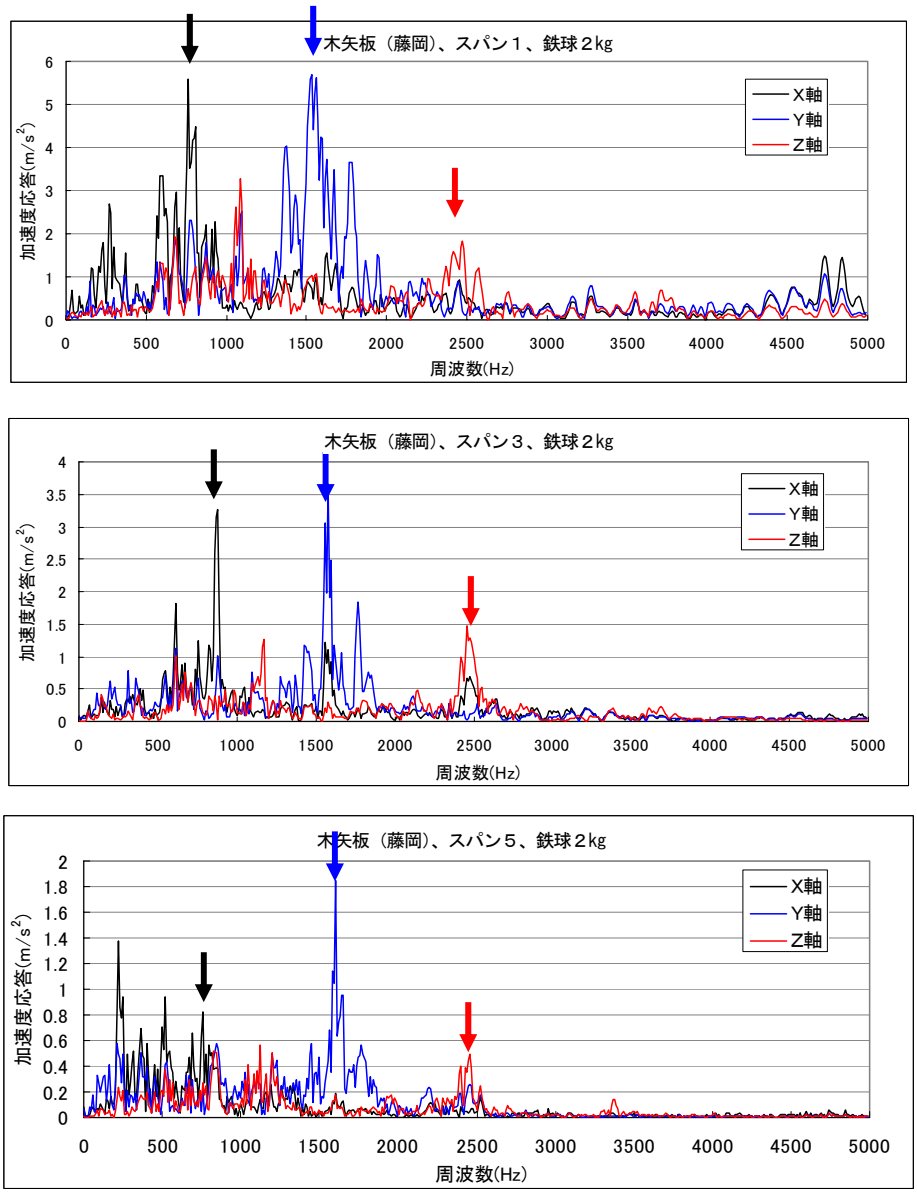


図 3.54　衝撃スパン位置に着目した加速度応答スペクトルの比較（衝撃位置 1C）

（ⅳ）振動計取り付け位置の比較＞

図 3.55 は、振動計取り付け位置の違い（防護柵延長方向端部の斜面側、防護柵延長方向内部（端部から 5 スパン）の斜面側、および防護柵延長方向端部道路側）の加速度応答スペクトルを比較結果である。衝撃位置のずれ、ノイズの影響により衝撃によって励起されたスペクトルの周波数に若干ばらつきがあるものの、概ね卓越スペクトルの傾向は下記のとおり同様であると考える。

・矢板上下方向 X 軸：600～800Hz

・矢板水平方向 Y 軸：1,600～1,800Hz

・矢板垂直方向 Z 軸：2,300～2,500Hz

このことから、振動計の取り付け位置は周波数特性に大きく影響しないものと考える。

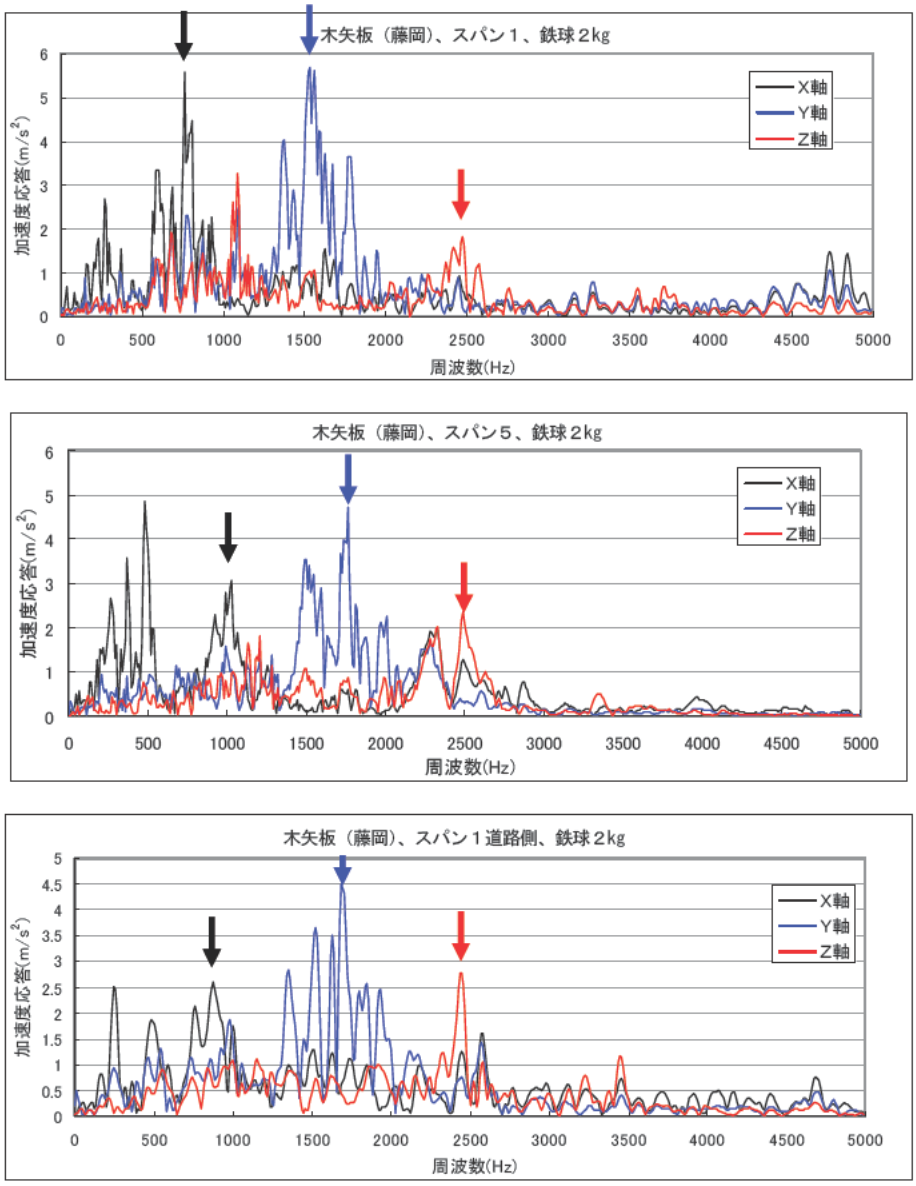


図 3.55　振動計取付位置に着目した加速度応答スペクトルの比較（衝撃位置 1C）

（ｖ）振動源の比較

図 3.56 は、振動源の違い（衝撃（鉄球）と交通車両、工事車両）による加速度応答スペクトルの比較結果である。衝撃による振動と交通車両等による振動の Y、Z 成分において、1,500Hz 以上の高い周波数領域で、ほぼ同じ帯域にピーク周波数が認められる。（例えば Y 軸の 1,700Hz 付近や Z 軸の 2,500Hz 付近）。一方で、1,000Hz より低い周波数領域では、図中点線で示したように、衝撃による振動は 250～300、600~700Hz にピーク周波数が認められるのに対し、交通車両等による振動の場合は、100～150Hz 付近、800～1,000Hz 付近にピーク周波数が認められる。このように衝撃による振動と交通車両による振動とでは、交通車両等による振動に 100 Hz 付近でピーク周波数がみられる点で特に異なる。

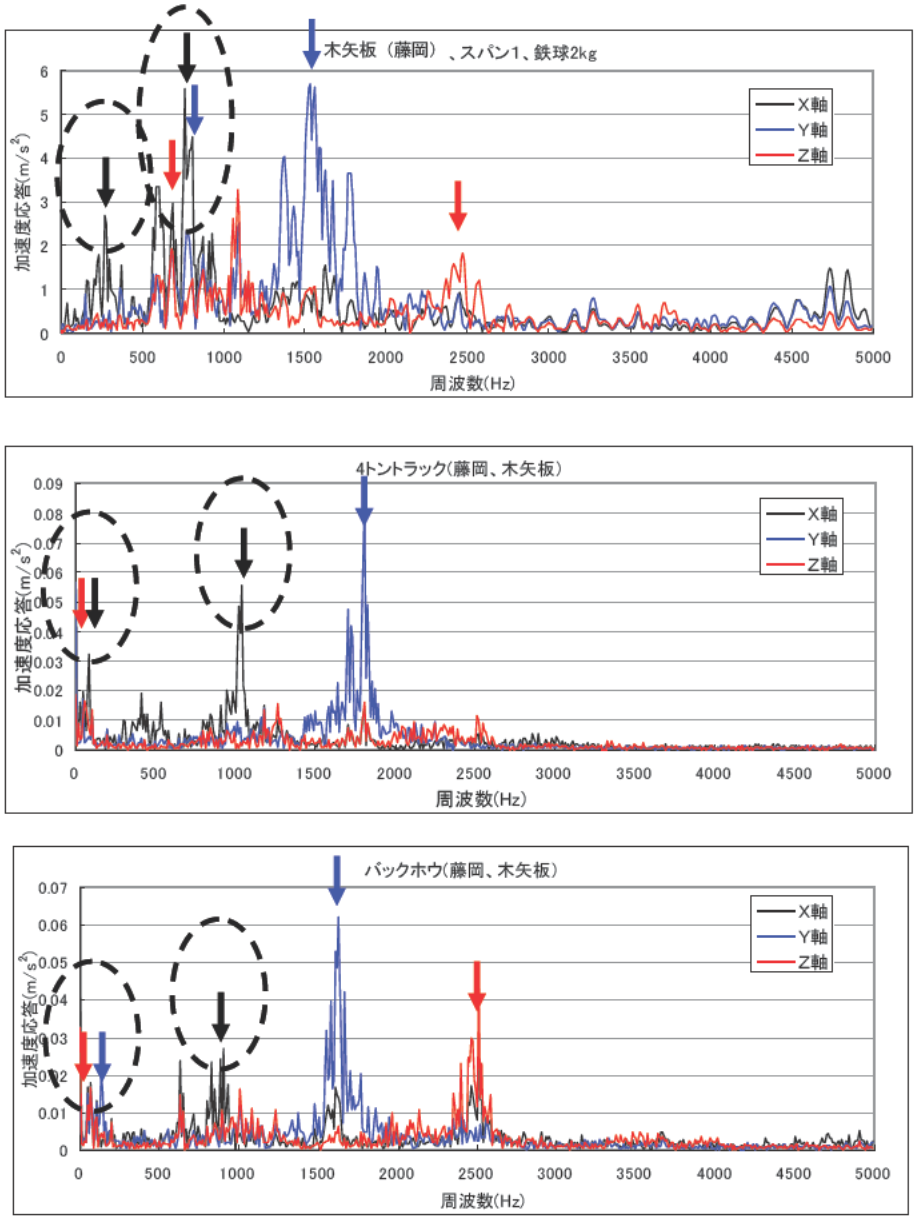


図 3.56　振動源に着目した加速度応答スペクトルの比較

ここで、図 3.57 に 1,000Hz 以下の低周波数帯域に着目した振り子方式（鉄球）や傾斜台（玉石）による衝撃実験と交通振動の加速度応答スペクトルの比較結果（矢板垂直方向の Z 軸）を示す。図で明らかなとおり、衝撃実験の場合 200～500Hz 付近に衝撃によって励起されたスペクトル成分が認められるが、同じ帯域での励起されたスペクトルは交通振動には顕著に認められない。交通振動の場合は 50～100Hz に分布している。したがって、本結果より、フィルタリングによって 200～500Hz の周波数帯域の波形データに着目すれば、落石のみの検知が行えるものと考える。

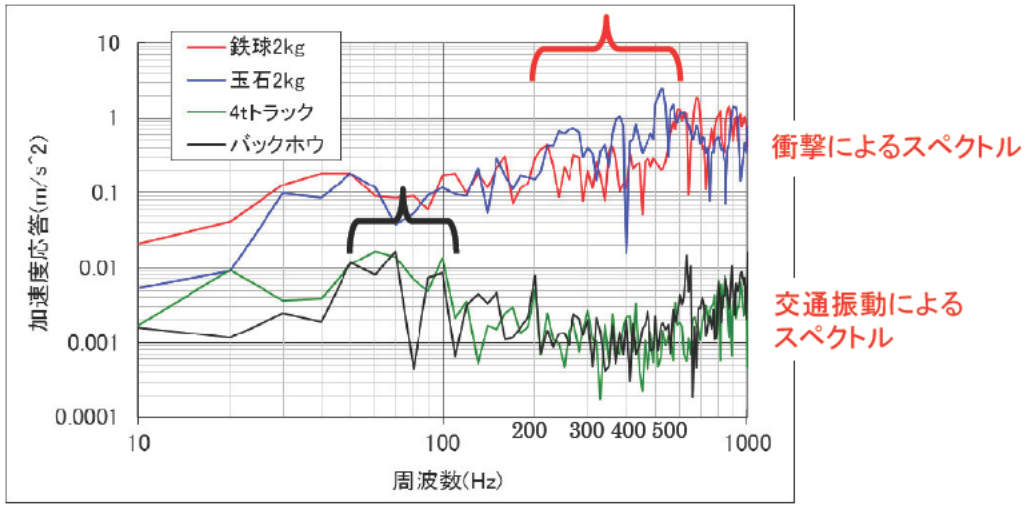


図 3.57　振動源に着目した加速度応答スペクトルの比較（1,000Hz 以下、Z 軸）

②振幅特性

図 3.58 は、振り子方式衝撃実験において、鉄球質量、衝撃高さの違いによる最大振幅を比較したものである。値のばらつきはあるが、図より下記の点が明らかである。

- 最大振幅の値は、衝撃材料の質量と概ね正の相関があると推察される。
- 最大振幅の大きさはY軸＞X軸＞Z軸であり、土木研究所構内での基礎実験とは異なる。
- 衝撃高さの最大振幅の大きさは、3段目＞2段目＞1段目（振動計取り付け位置（防護柵高の 2 分の 1）に近い順）であり、鋼製横矢板の仮設防護柵（相模原市）（図 3.88 参照）と異なる。

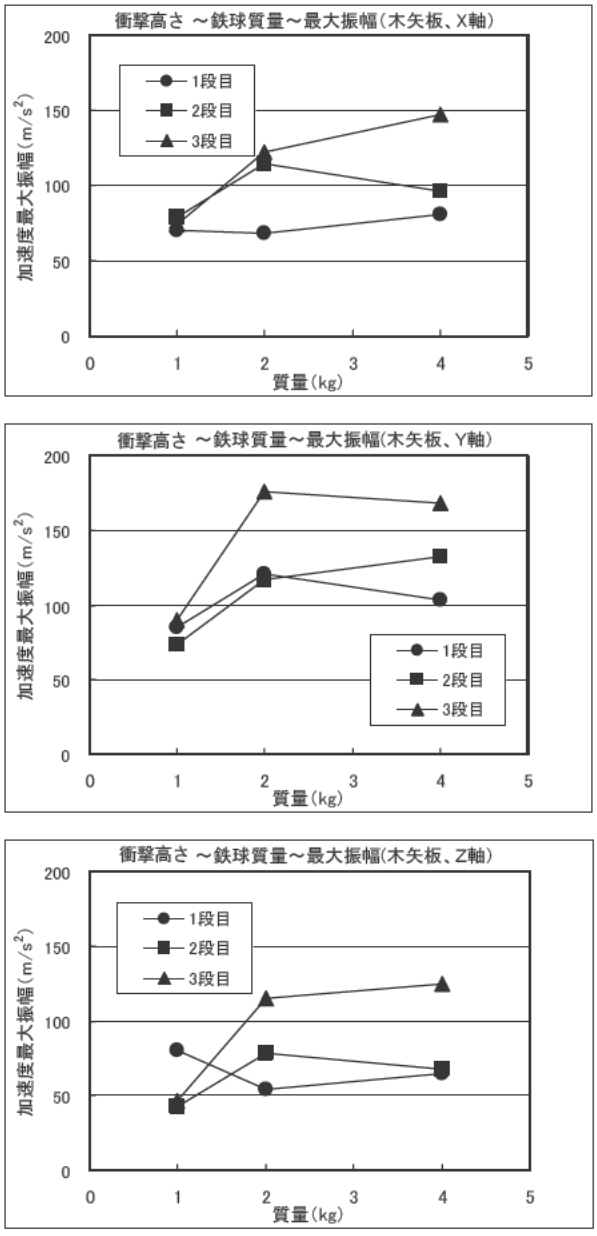


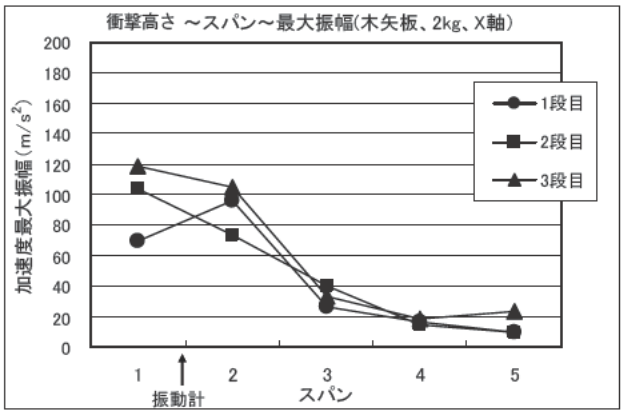
図 3.58　衝撃高さ、衝撃材料の質量の着目した最大振幅の比較
（衝撃材料：鉄球、衝撃位置：スパン 1）

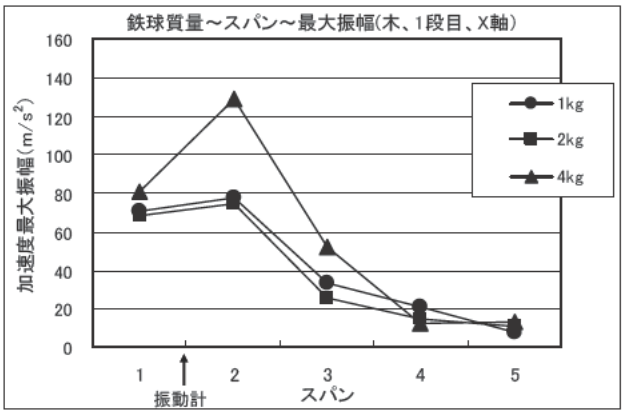
図 3.59 は、振り子方式衝撃試験において、衝撃高さ、衝撃スパン位置の違いによる最大振幅を比較したものである。図より次の点が認められる。

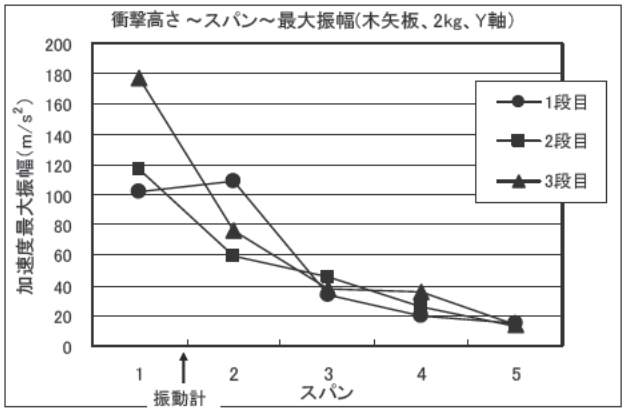
- いずれの測定方向、衝撃高さについても、衝撃スパン位置が離れることにより最大振幅が小さくなる（距離に応じて減衰する）。
- 振動計を取り付けたH形鋼支柱の両側スパン（スパン 1 およびスパン 2）については、衝撃高さによる最大振幅の大きさは 3 段目 ＞ 2 段目 ＞ 1 段目（振動計取り付け位置（防護柵高の 2 分の 1 に近い順）といった傾向にある。しかし、スパン 3 以降になると、衝撃高さによる最大振幅の大きさに明瞭な違いはほとんどない。

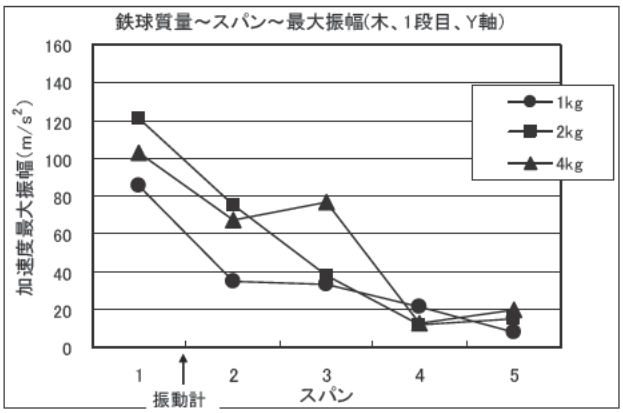
図 3.60～図 3.62 は、振り子方式衝撃実験において、衝撃質量と衝撃スパン位置の違いによる最大振幅を各衝撃高さについて整理したものである。各衝撃高さいずれにおいても最大振幅の距離減衰が認められる。しかし、図より次の点が明らかである。

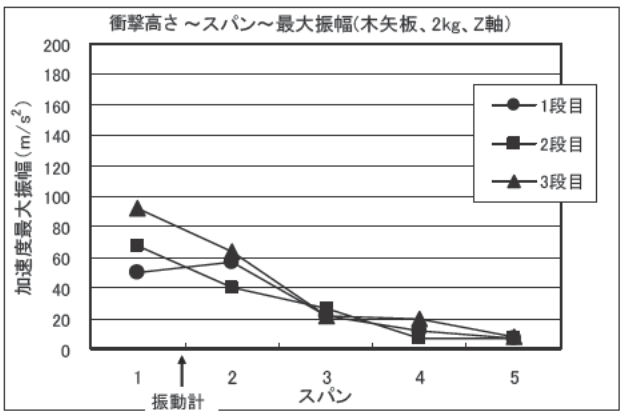
- 振動計設置高さに比較的近い 3 段目の衝撃の場合、1 段目、2 段目の衝撃に比べて、スパン 2 からスパン 3 への振幅値の減衰割合が大きい。さらに、大きな質量による衝撃時にその傾向が大きい（すなわち、図 3.62 に示すようにスパン 3 を挟んだ減衰曲線の屈曲の程度が大きい）。











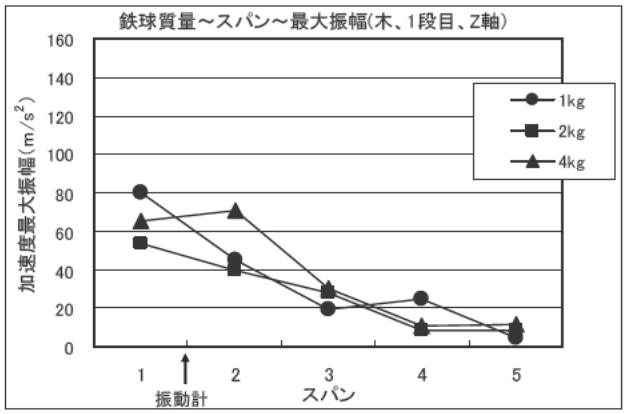
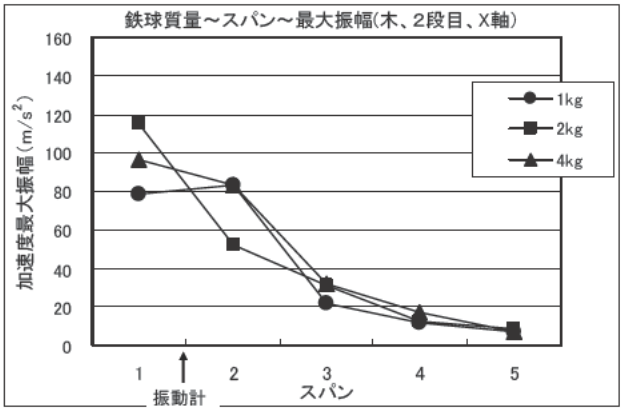
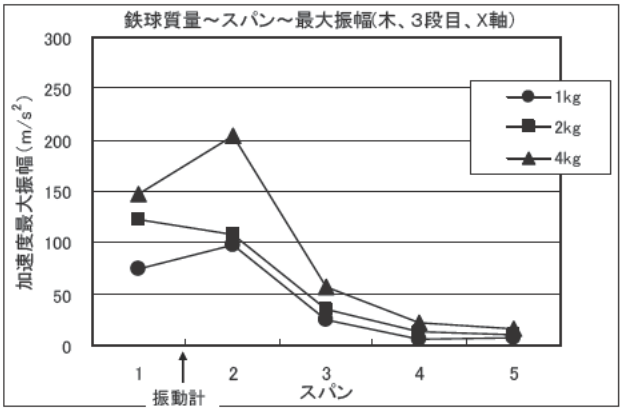
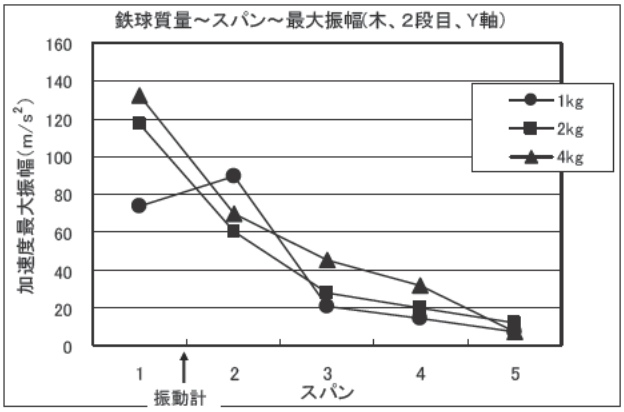


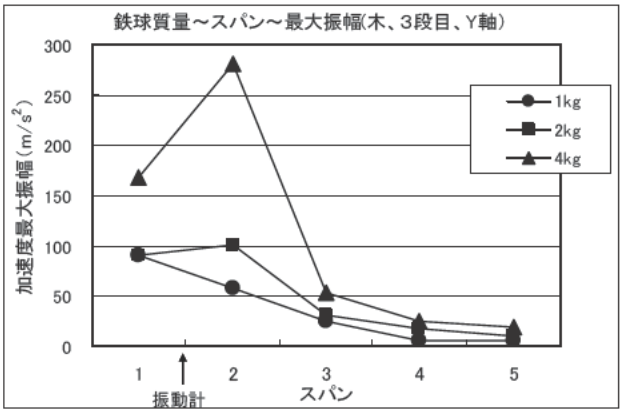
図 3.59　衝撃高さ、衝撃スパン位置に
着目した最大振幅の比較
（振幅値：横矢板衝撃箇所 B～D の平均値）

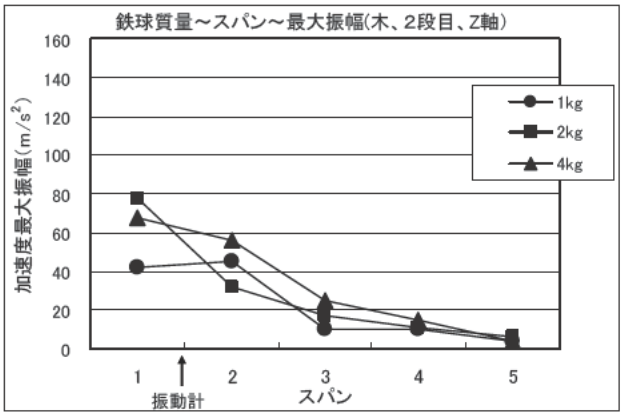
図 3.60　衝撃材料の質量に着目した
最大振幅の比較
（鉄球、衝撃高さ１段目）











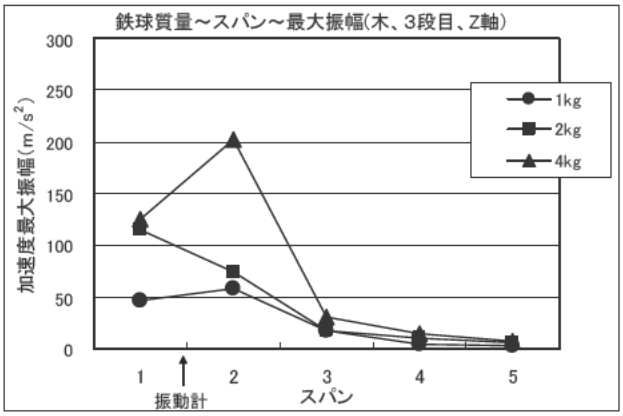


図 3.61　衝撃材料の質量に着目した
最大振幅の比較
（鉄球、衝撃高さ２段目）

図 3.62　衝撃材料の質量に着目した
最大振幅の比較
（鉄球、衝撃高さ３段目）

図 3.63 は、衝撃方法の違い（振り子方式（鉄球）と傾斜台（玉石））に着目し、質量の違いによる最大振幅を比較したものである。鉄球と同様に玉石による衝撃についても、最大振幅の距離減衰が認められる。また、図より次の点が認められる。

- スパン 3 以降の加速度振幅について、質量の違いによる明瞭な差がなくなっており、玉石でその傾向が大きい。

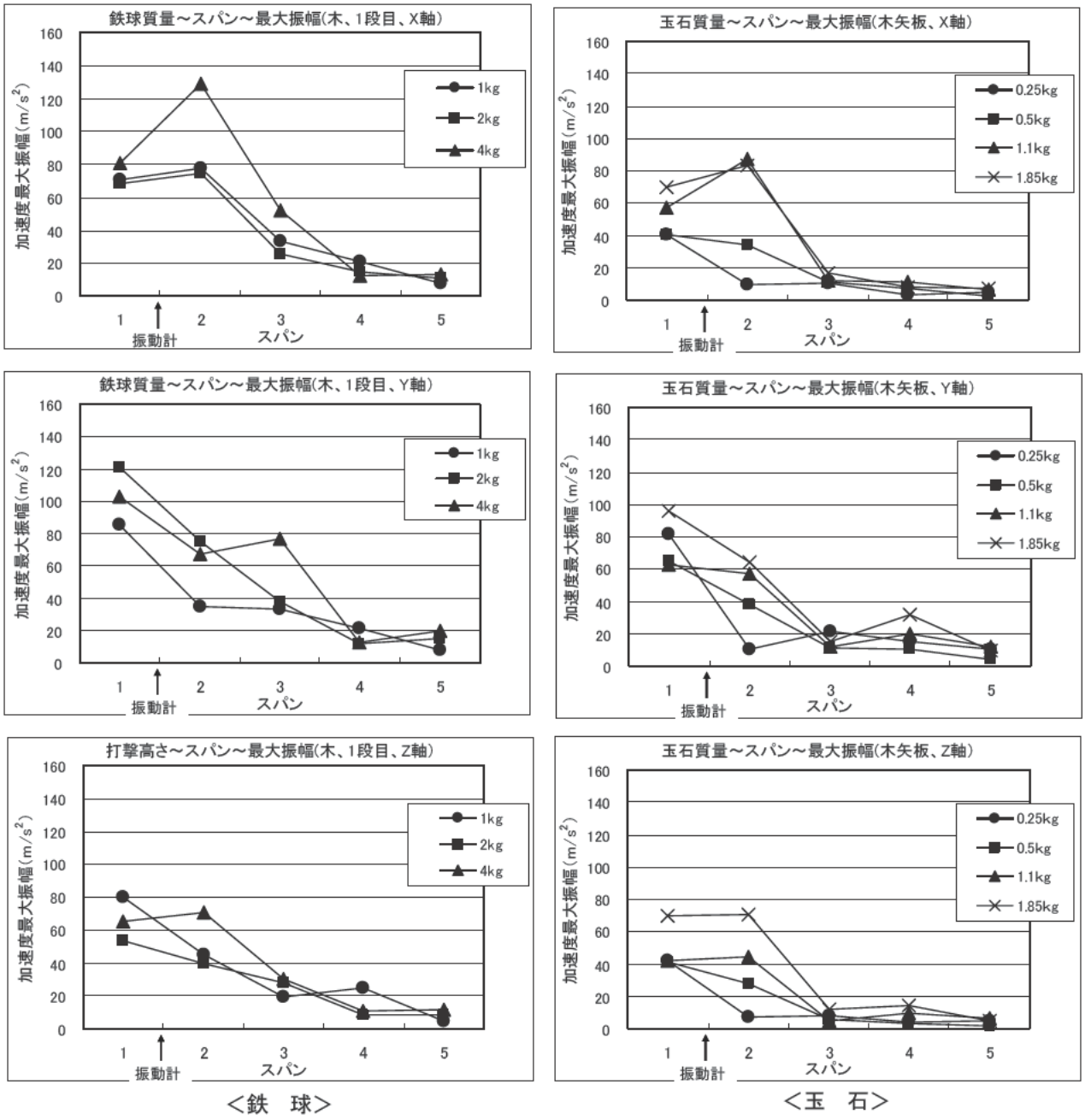


図 3.63　衝撃材料の違い、質量に着目した最大振幅の比較
（横矢板衝撃箇所 C（中央）、衝撃高さ 1 段目）

図 3.64 は、仮設防護柵に隣接した県道を通行する交通車両、あるいは工事区域を走行した工事車両（バックホウ）といった車両起源の振動による最大振幅をまとめたものである。図より、次の点が認められる。

- 交通車両等による最大振幅は、鉄球等の衝撃実験と同じ、Y 軸＞X 軸＞Z 軸に大きい。
- 最大振幅は交通車両で 0.6m/s² 以下、工事車両で 1.1m/s² 以下であり、スパン 5 までの鉄球等による衝撃実験の最小値（1.74m/s²）よりも小さい値であった。このことは、落石などの崩落時の振幅のしきい値を 1.1m/s² 以上に設定しておけば、交通車両による振動には感知しない可能性を示すものといえる。

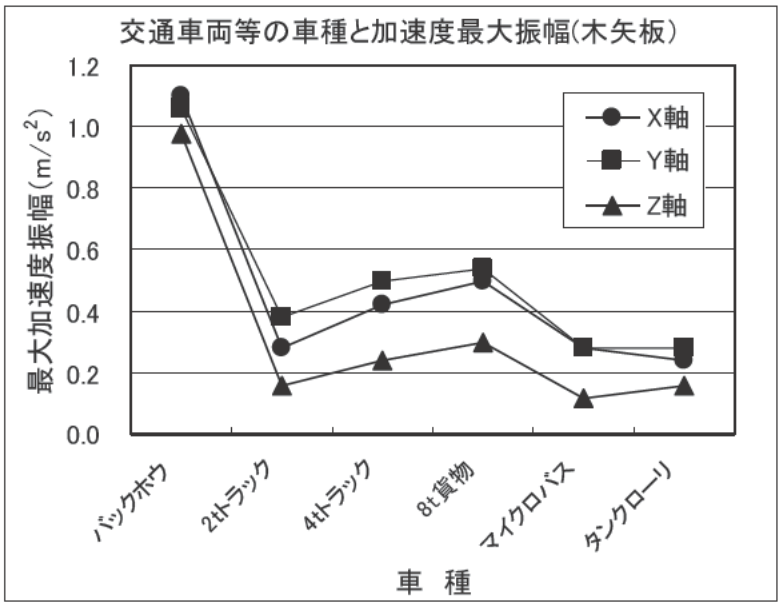


図 3.64　交通車両等の車種に着目した最大振幅の比較

② まとめ

木製横矢板を用いた仮設防護柵の実験結果より得られた主な知見は以下のとおりである。

＜周波数特性＞

- 土木研究所構内の基礎実験と現地基礎実験との加速度応答スペクトルの結果から、同じ素材による仮設防護柵でも設置場所（地盤条件）や構造の違いによって周波数特性が大きく異なることが明らかとなった。
- 現地基礎実験での加速度応答スペクトルを比較した結果、衝撃材料、衝撃スパン位置、振動計取り付け位置に違いによって、周波数特性は影響を受けないことが認められた。
- 交通振動による振動と鉄球等の衝撃による振動のピーク周波数を比較すると、高い周波数領域（1,000Hz 以上）では同じ帯域に分布するが、1,000Hz 以下の周波数帯域では明確に異なることが明らかとなった。

＜振幅特性＞

- 加速度振幅の最大値が出現する測定成分が、土木研究所構内の基礎実験と現地基礎実験で異なることが認められた。
- 振動計設置位置から衝撃スパン位置が遠ざかるにつれて、最大振幅は低減（距離に応じて減衰）する。
- 振動計を設置した H 形鋼両側スパンよりも離れたスパンの最大振幅は、衝撃高さや衝撃質量（エネルギー）による違いが明瞭でない。
- 最大振幅は交通車両で 0.6m/s^2 以下、工事車両で 1.1m/s^2 以下であり、スパン 5 までの鉄球等による衝撃実験の最小値（1.74m/s^2）よりも小さい値であった。このことは、落石などの崩落時の振幅のしきい値を 1.1m/s^2 以上に設定しておけば、交通車両による振動には感知しない可能性を示すものといえる。

3.2.5　実験結果 2（鋼製横矢板）

(1) 速度型振動計による実験結果

① 速度型振動計の設置場所

図 3.65 は、速度型振動計を設置した場所である。

H 鋼の「H-2」では、道路側と斜面側に設置し、「H-4」では斜面側に設置した。

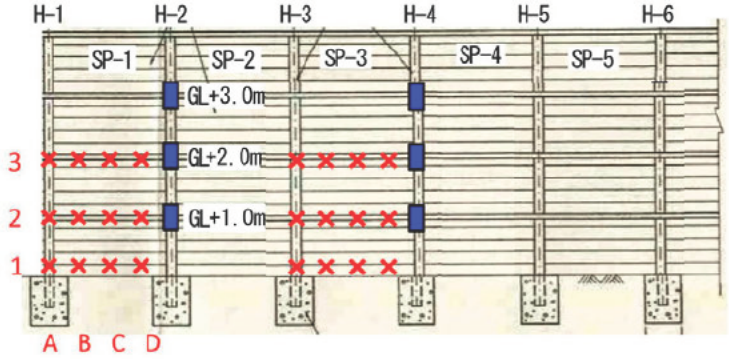


図 3.65　速度型振動計を設置した場所

② 自動車走行振動

図 3.66 は、自動車走行振動による代表波形であり、図 3.67 は、自動車走行振動の測定結果である。速度型振動計による自動車走行振動の特徴（振幅、周波数）を以下にまとめた。

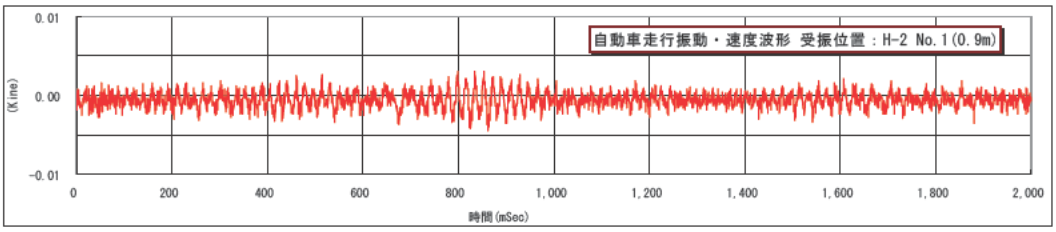


図 3.66　速度型振動計による自動車走行振動の例

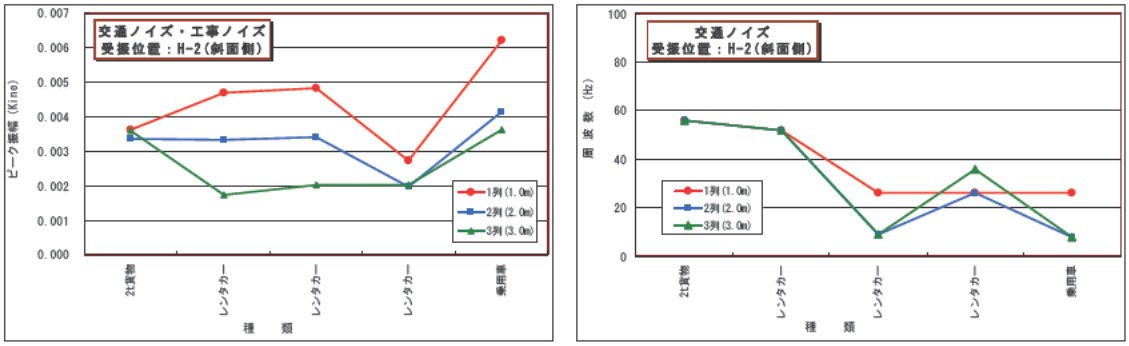


図 3.67　速度型振動計による自動車走行振動の測定結果（左：振幅、右：周波数）

・ 速度型振動計の位置No.1（G=1.0m）付近の振動が、最も大きくなる傾向がある。

・ 最も大きな振動は，乗用車通行時の0.006Kine（6mKine）であった。
この値は、藤岡市内の木製横矢板で検出された貨物車走行時の0.06Kine（60mKine）の1/10程度であり、鋼製横矢板に関しては交通振動（ノイズ）は殆ど障害にならないと考える。
・ 走行時の周波数は概ね40Hzより低い傾向が認められるが、中には50Hzを超える走行振動も検出されている。

図 3.68 は、自動車走行振動の振幅と周波数の関係グラフである。

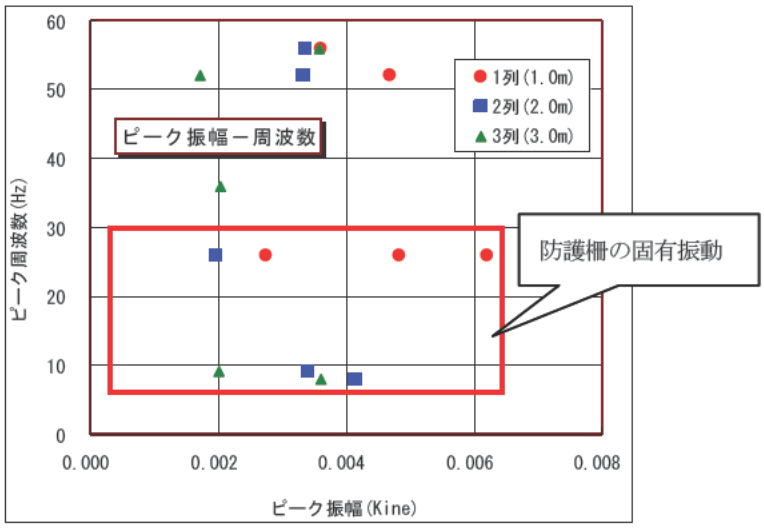


図 3.68　自動車走行振動のピーク振幅とピーク周波数の関係

・ ピーク周波数で見た場合、3つのブロックに区分されるようである。10Hzより僅かに低いグループと約27Hzのグループは防護柵（H形鋼や鋼製横矢板）の固有振動であると考える。
・ 土木研究所構内での実験結果から、計測すべき周波数帯を70Hz～300Hzと提案したが、このような高周波数帯（多少前後含む）を使用する場合、自動車走行振動のピーク振幅は概ね「0.005Kine（5mKine)」以下と予想される。

③ 周波数特性

＜衝撃方向、スパン及び対象による比較：鉄球＞

図 3.69 は、「SP-1 の 3 段目(3-B)」に鉄球 2kg の衝撃を与えた時に、速度型振動計で「H-2」支柱の No.2（GL+2.0m）の道路側と斜面側、及び「H-4」支柱の No.2（GL+2.0m）の斜面側で得られる波形スペクトルに、土木研究所構内で測定したスペクトルを重ね合わせたものである。

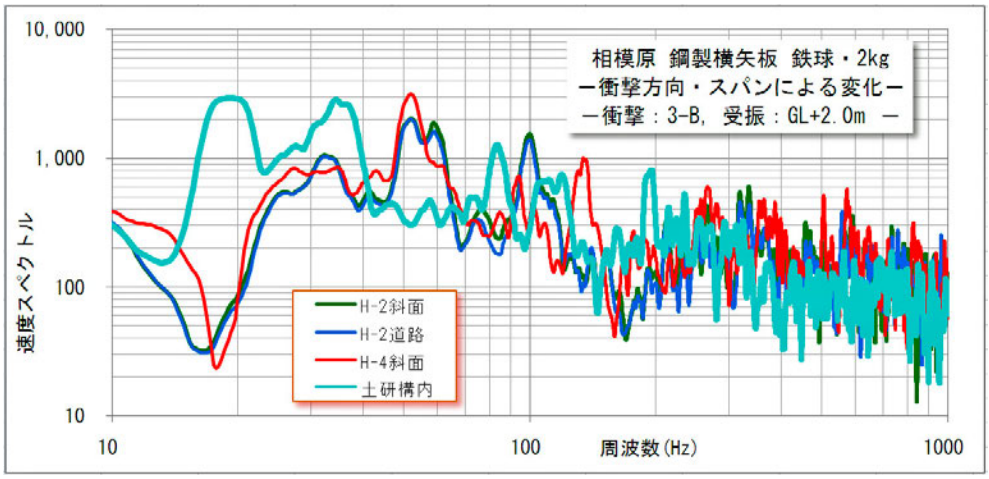


図 3.69　鉄球の衝撃方向、スパンや対象による速度スペクトルの例

- 相模原の鋼製横矢板でのスペクトルのうち、「H-2」の両側のスペクトルはほぼ同一である。
- 土木研究所構内で検出されている約20Hzと約35Hzの成分波は、鋼製横矢板に接して設置されている木製横矢板の影響であろう。
- 「H-2」と「H-4」では、ピークとなる周波数に微妙な差が見られる。例えば，「H-2」でのピーク周波数は100Hzであるが、「H-4」では約130Hzと高くなっている。

＜受振位置の比較：鉄球、玉石＞

図 3.70 は、鉄球を「SP-1 の 3-B」に衝撃を与えた時に発生した衝撃振動を、3 箇所の速度型振動計で同時計測した振動波形の速度スペクトルである。

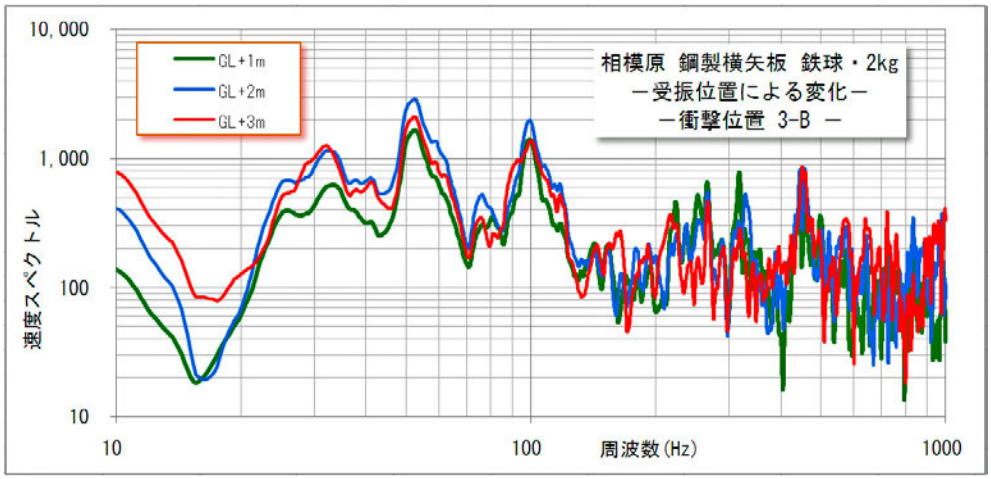


図 3.70　鉄球衝撃時の速度スペクトルと受振点位置

・速度スペクトルの70Hzより高い周波数帯域には大きな違いはみられないが、70Hzより低い周波数帯域では、速度型振動計の設置高さによって微妙な差がみられる。

・ 仮設防護柵（H形鋼、鋼製横矢板）の固有振動（自由振動）が影響している可能性がある。

図 3.71 は、質量 0.92kg の玉石で木製横矢板に衝撃を与えた時に発生した振動を、3 箇所の受振点で同時に測定した振動波形の速度スペクトルである。

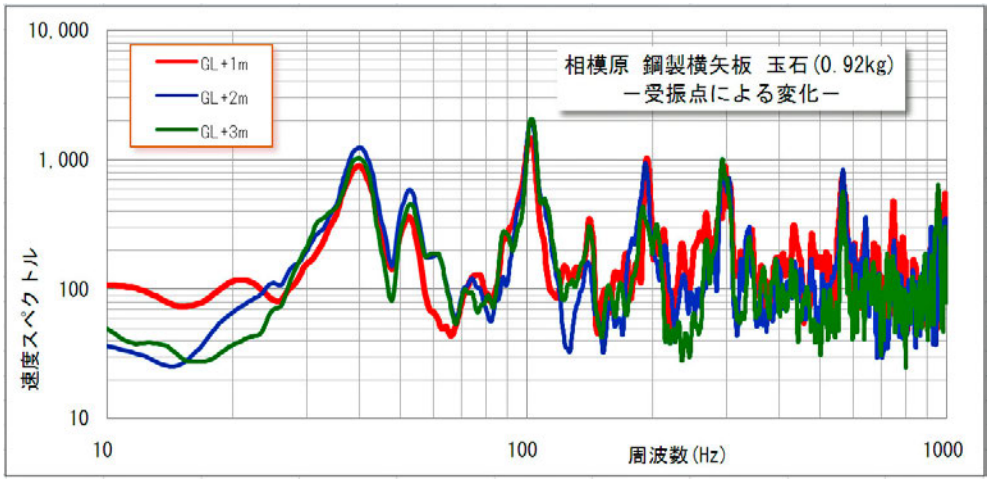


図 3.71　玉石衝突時の速度スペクトルと受振点位置

・ 一部の周波数帯の振幅に多少の違いはあるものの、3箇所の受振点の速度スペクトルに大きな違いは見られないので、基本的にどの位置に速度型振動計を設置しても大差はないことが確認できた。

＜衝撃距離による比較と交通振動の影響：鉄球、玉石＞

- 図3.72は、質量2.0Kgの鉄球を「SP-1」、「SP-3」及び「SP-5」の「3-B」に衝撃を与えた時に発生した衝撃振動を「H-2のNo.2（GL+2.0m）」で受振した振動波形の速度スペクトルに、最も振幅が大きかった自動車の走行振動のスペクトルを重ね合わせたものである。

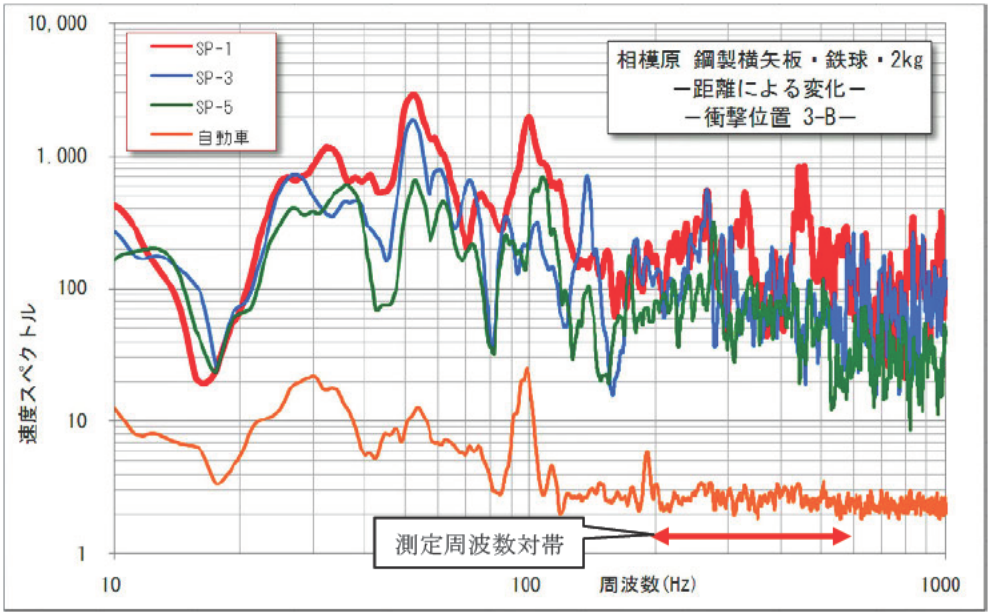


図 3.72　スパン位置による鉄球衝撃振動と自動車走行振動の速度スペクトル

- 自動車走行時の防護柵自由振動は、木製横矢板に比べてかなり小さいことを確認した。
- 鉄球衝突時と自動車走行時のいずれも、約100Hzにピークが存在するが、これは自動車走行振動自体、あるいは、防護柵を構成するどれかの材料の固有振動（自由振動）であると考えられる。
- 全ての周波数帯域において、「SP-5」で発生した衝撃振動と、自動車走行振動の振幅比が10倍程度存在するため、自動車の走行による影響は殆ど無いと言える。
- 図3.72に記入した「測定周波数帯（案）」は、藤岡市内の木製横矢板の仮設防護柵での実験結果によるが、鋼矢板の場合もこの周波数帯で十分なS/N比が得られたことが判明した。

図 3.73 は、質量 0.92Kg の玉石を「SP-1」、「SP-3」及び「SP-5」に衝撃を与えた時に発生した衝撃振動を「H-2 の No.2（GL+2.0m）」で受振した振動波形の速度スペクトルに、最も振幅が大きかった「自動車」の走行振動のスペクトルを重ね合わせたものである。

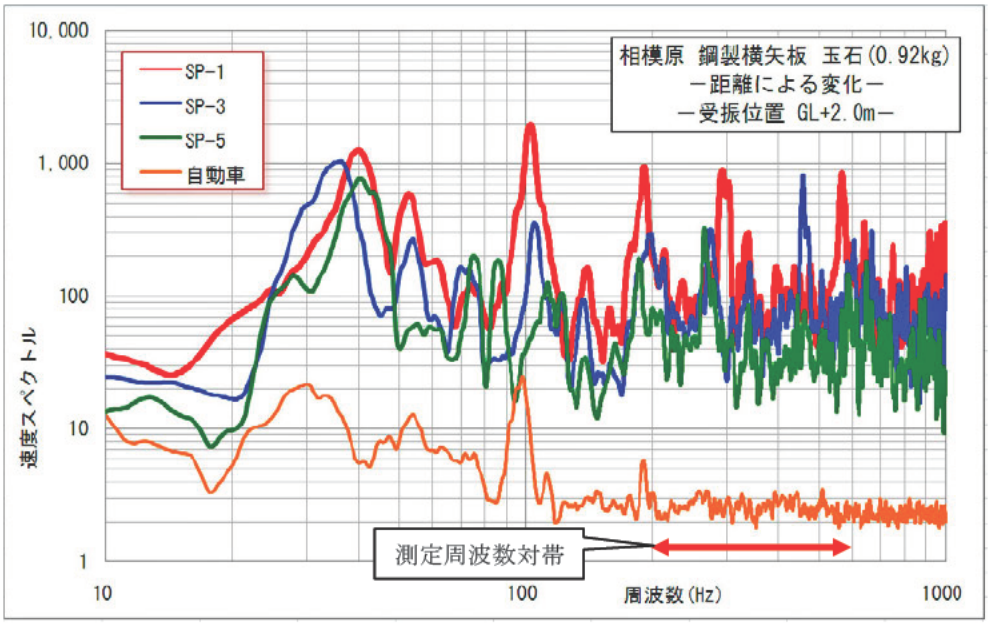


図 3.73　スパン位置による玉石衝突振動と自動車走行振動の速度スペクトル

・一部のピークを除いて、スパンの位置によるピーク周波数の差があまりみられないことを確認した。

・ 「SP-5」に衝撃を与えた場合でも、玉石の衝撃振動の振幅と自動車走行時の振幅差が相当程度存在することを確認した。

・ より軽い玉石の衝突時の振動を検出する場合には、自動車走行時に発生した100Hzの成分波を避けた周波数帯の設定が必要と思われる。

・ 図3.73に記入した「測定周波数帯（案）」は、藤岡市内の木製横矢板の仮設防護柵での実験結果によるが、鋼矢板の場合もこの周波数帯で十分なS/N比が得られたことが判明した。

④ 振幅特性

（ｉ）鉄球による速度波形

図 3.74 は、鉄球を「SP-1 の 3-C」と「SP-5 の 3-C」に衝撃を与えた時に発生した、衝撃振動波形の例である。

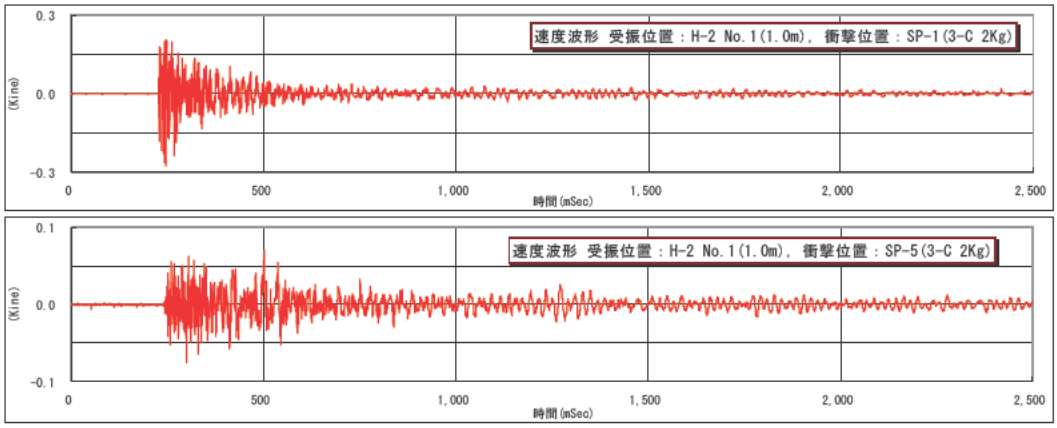
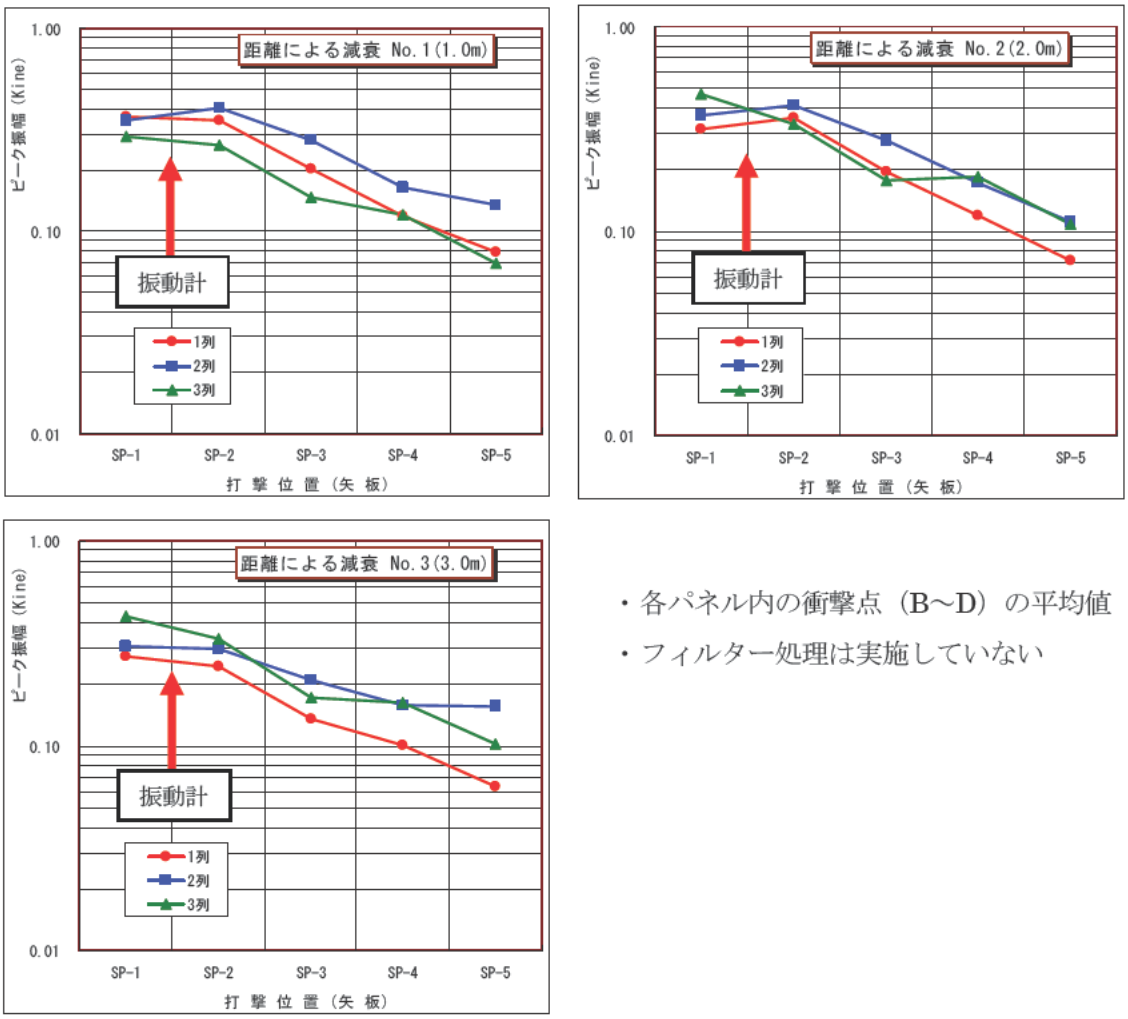


図 3.74　鉄球による速度波形（例）

（ii）距離減衰（スパン）：鉄球

図 3.75 は、質量 2kg の鉄球の衝撃位置（スパン）とピーク速度振幅の関係である。



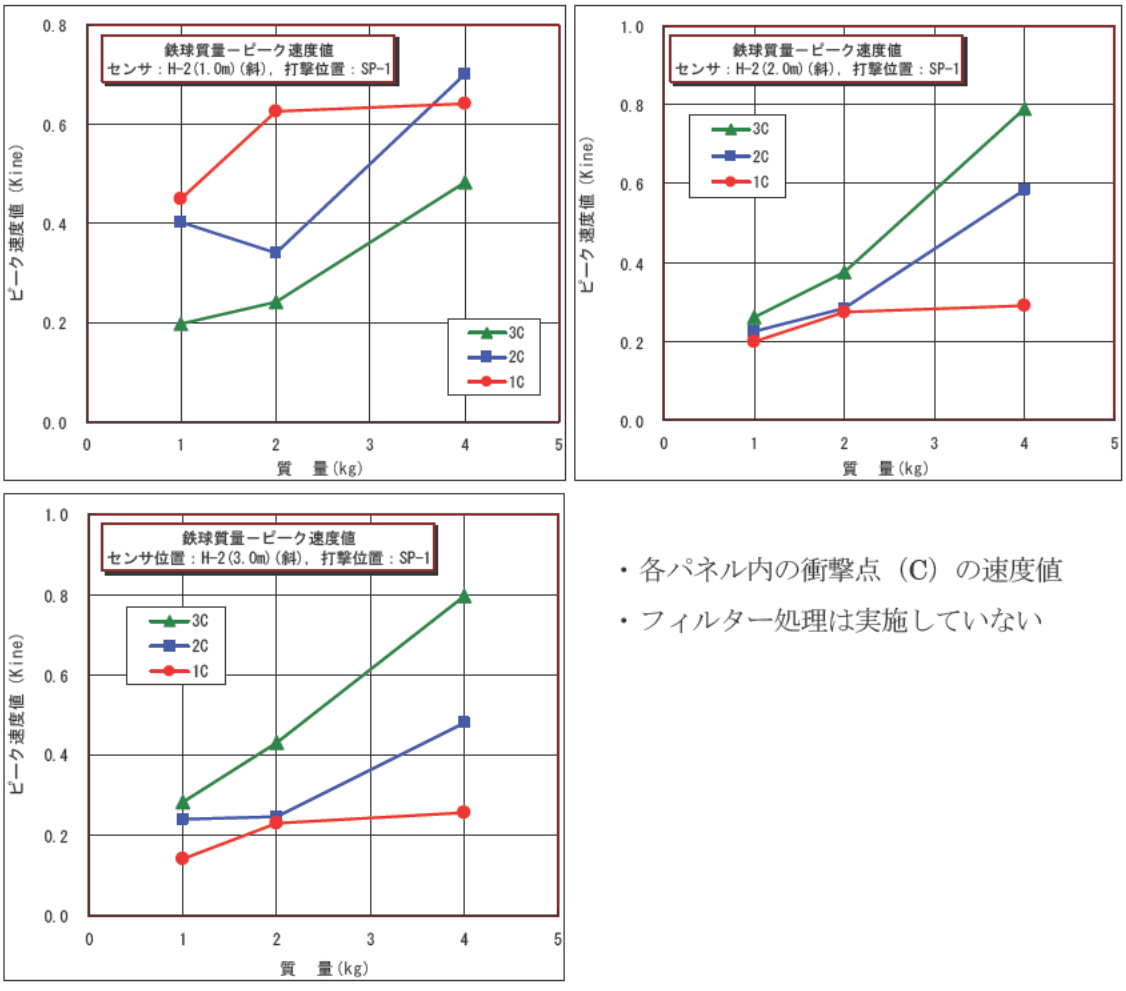
・各パネル内の衝撃点（B～D）の平均値
・フィルター処理は実施していない

図 3.75 鉄球の衝撃位置（スパン）とピーク振幅（3 箇所の平均値）の関係

・ 鉄球の衝撃を「SP-1」から「SP-5」に与えた時に速度型振動計を「SP-1」と「SP-3」の中間に位置する「H-2」に設置して測定した時のピーク振幅の平均値である。
・ 速度型振動計を設置したH形鋼の左右である「SP-1」と「SP-2」での衝撃振動の振幅はほぼ同じであった。
・ 一部の衝撃を除き、受振位置No.1（GL+1.0m）～No.3（GL+3.0m）にかかわらず、距離（スパン）による減衰の傾向はほぼ同じ傾斜を示している。

（iii）質量と速度振幅その１：鉄球

図 3.76 は、鉄球の質量と速度振幅の関係をまとめたものである。



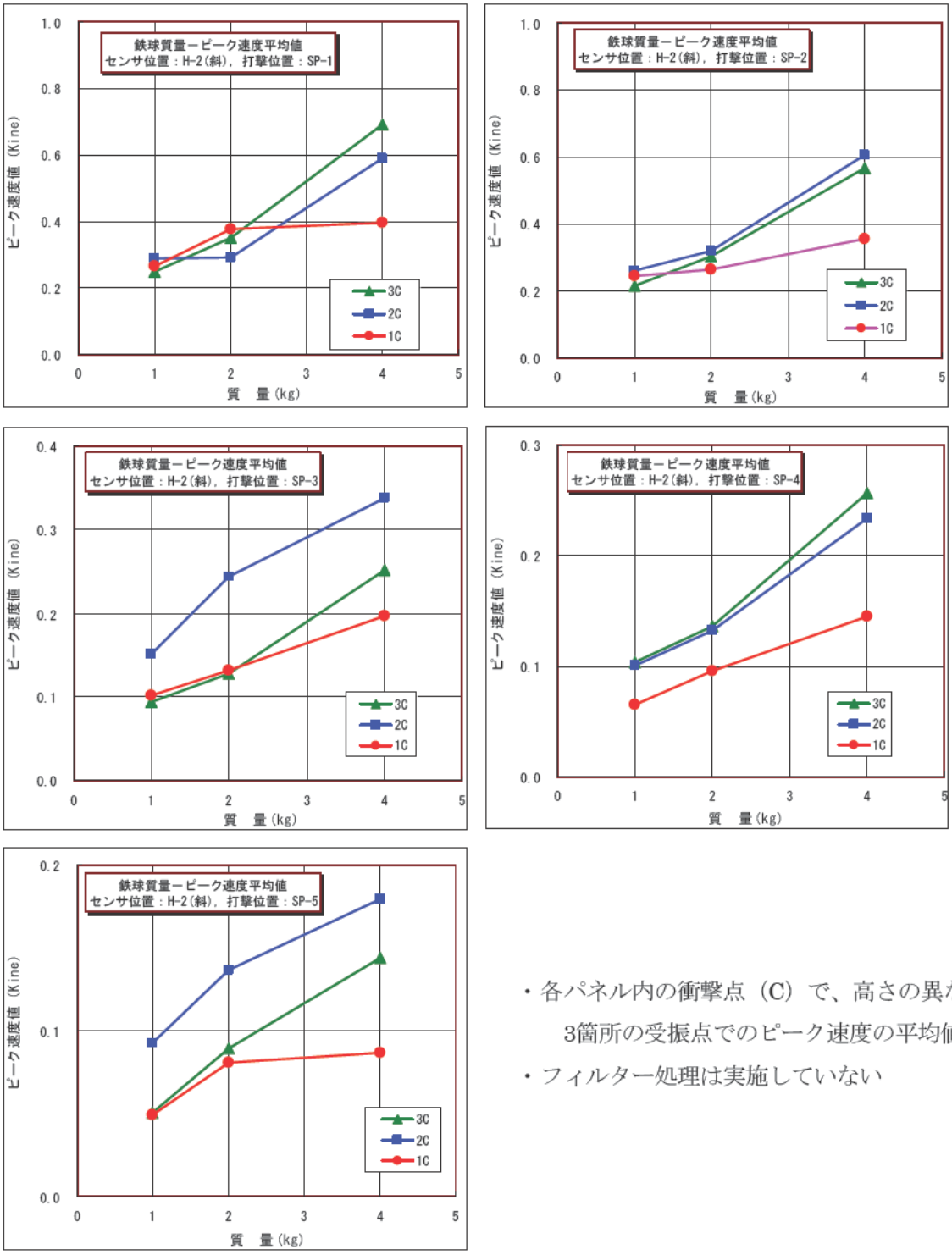
・各パネル内の衝撃点（C）の速度値
・フィルター処理は実施していない

図 3.76 鉄球質量とピーク振幅（平均値）の関係

・ 衝撃点が「1-C」の場合は、鉄球質量～速度振幅の関係式の傾斜（α）は、極めて緩やかであり、藤岡市での木製横矢板の仮設防護柵にも見られる現象であった。

（iv）質量、衝撃位置（スパン）と速度振幅：鉄球

図 3.77 は、鉄球の質量と衝撃位置（スパン）に対する速度振幅の関係である。



・各パネル内の衝撃点（C）で、高さの異なる3箇所の受振点でのピーク速度の平均値

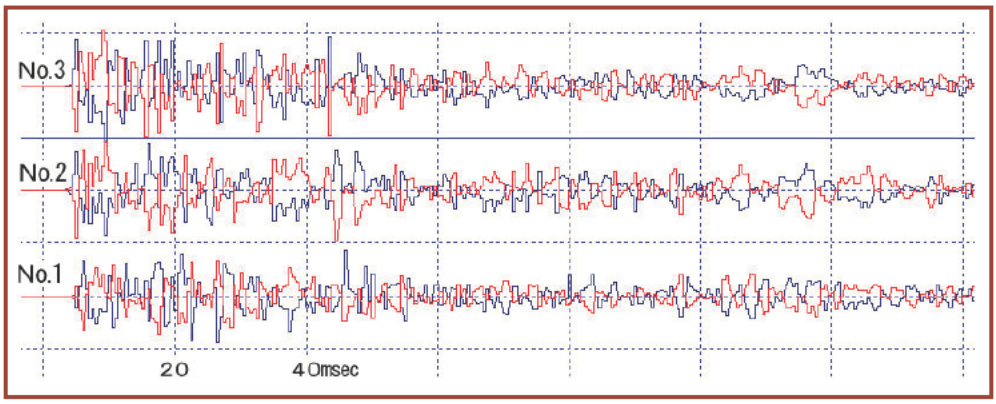
・フィルター処理は実施していない

図 3.77　鉄球の衝撃位置（スパン）　に着目した鉄球の質量と速度ピーク振幅の関係

・ 衝撃点が地表に最も近い「1-C」では、鉄球質量～ピーク速度振幅値（平均）関係式の傾斜がもっとも緩やかである。
・ これは、一番下の鋼矢板が地中に接しているため、一種の制振あるいは防振の作用が発生しているものと考えられ、藤岡市の木製横矢板の仮設防護柵でも検出された現象である。
・ 衝撃高さによって傾斜係数（α）が変わる可能性が高いので、鉄球質量～ピーク速度振幅値（平均）の関係式を求めるには十分な留意が必要である。

（ｖ）速度型振動計の設置位置：鉄球

図 3.78 は、速度型振動計を「H-2」の道路側と斜面側に設置した時の測定結果例である。



赤色：速度型振動計を H-2 の斜面側に設置　青色：速度型振動計を H-2 の道路側に設置

H-2 の道路側と斜面側に速度型振動計を同時設置した計測結果である

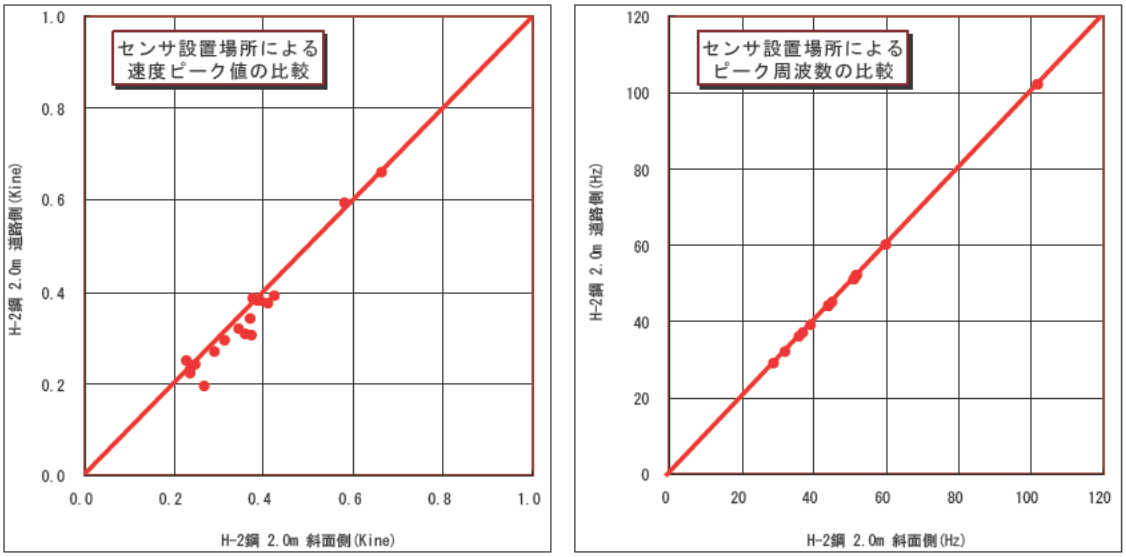


図 3.78　No. 2 速度型振動計（GL+2.0m）の設置位置による速度振幅と周波数

・ 同一の衝撃による振動であって、速度型振動計をH形鋼の道路側あるいは斜面側に設置しても、ほぼ同一の波形が計測できることが確認できた。

（vi）すべり台＋玉石による速度波形

図 3.79 は、質量 2.03kg の玉石を傾斜台を使用して「SP-1」と「SP-5」に衝突させた時の振動波形である。

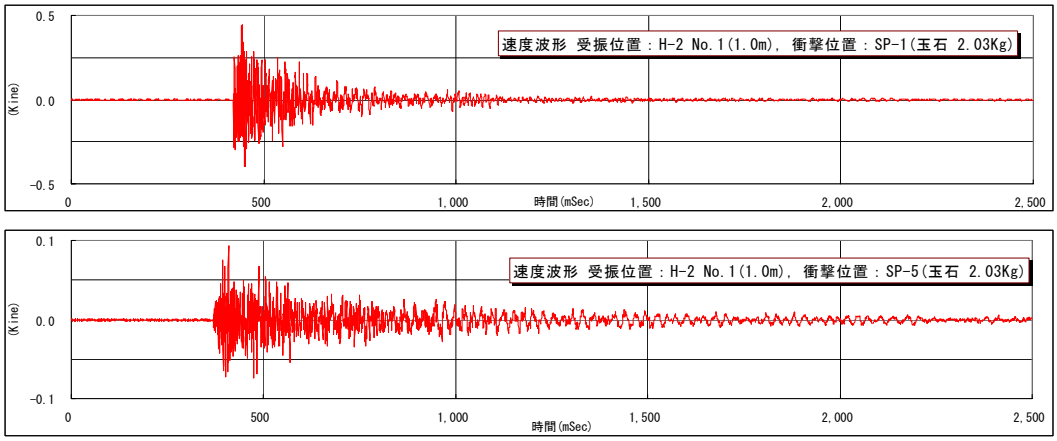
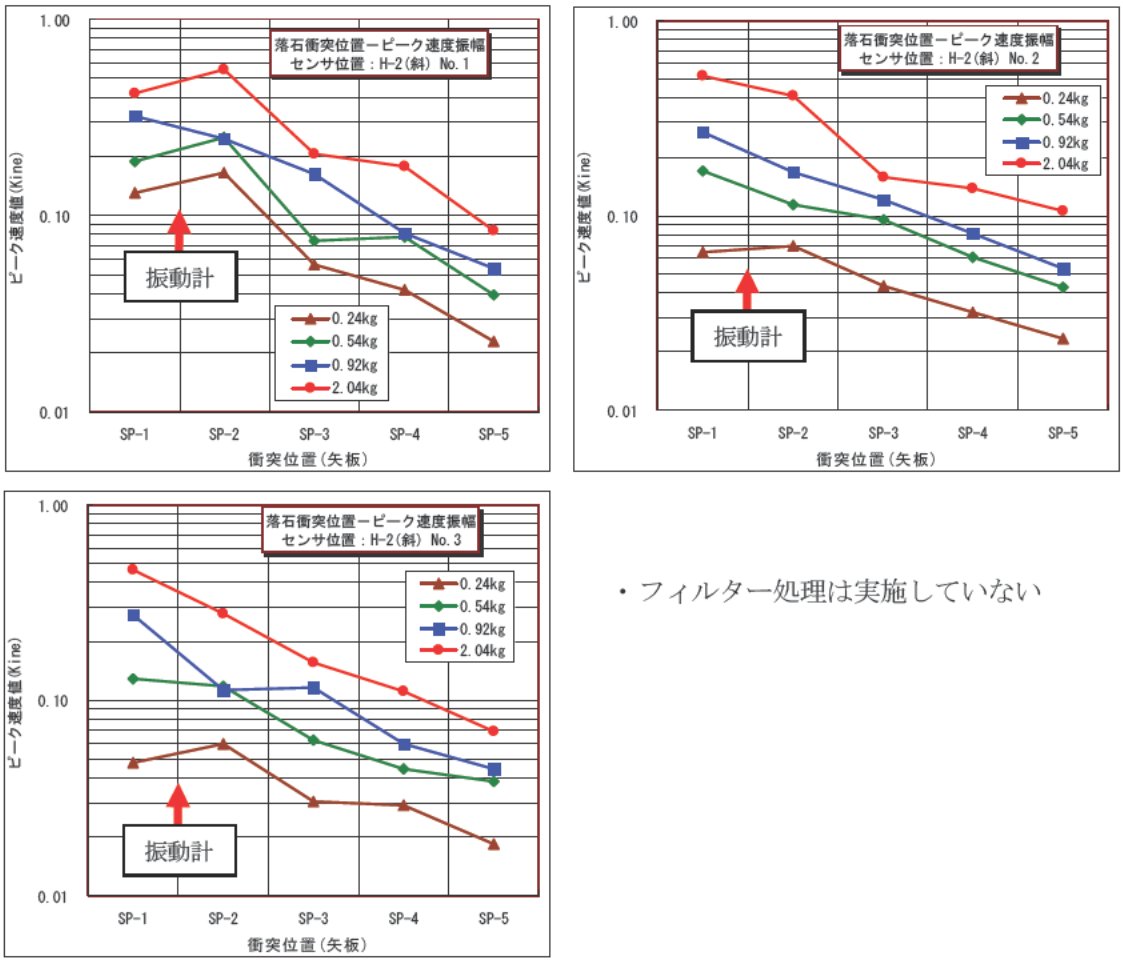


図 3.79　傾斜台＋玉石による速度波形（例）

（vii）距離減衰（スパン）：玉石

図 3.80 は、玉石の衝撃位置（スパン）とピーク速度振幅の関係である。



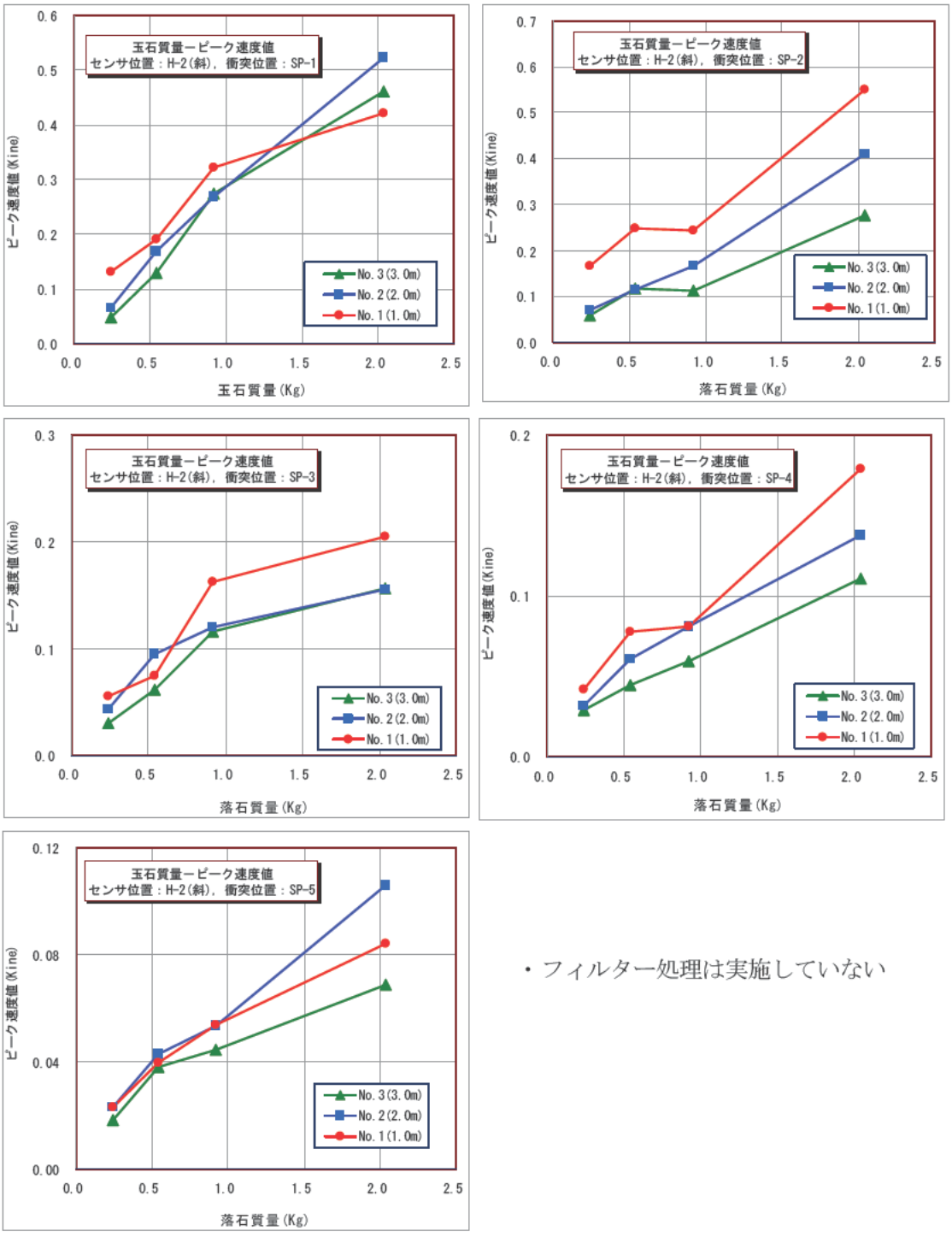
・フィルター処理は実施していない

図 3.80 玉石の衝突位置（スパン）と速度平均振幅の関係

- 速度型振動計を「SP-1」と「SP-3」の中間に位置する「H-2」に設置し、衝撃を「SP-1」から「SP-5」に与えた時のピーク振幅の平均値である。
- 一部の例外を除いて、解放端のある「SP-1」の方が「SP-2」より速度振幅のピーク値は大きい。
- 衝撃位置の離れによる距離減衰は、玉石の質量によらずほぼ同じ程度のようである。
- 自動車走行時の振動は，概ね0.005Kine以下であることが判明している。この値は「SP-5」で、質量0.24Kgの玉石を鋼製横矢板に衝突させた時のピーク値（0.02Kine前後）の1/4程度であることより、鋼製横矢板での振動計測に対する交通振動の影響は殆ど無いものと考えられる。

（viii）質量、衝撃位置（スパン）と速度振幅：玉石

図 3.81 は、玉石の質量と衝撃位置（スパン）に対する速度振幅の関係である。



・フィルター処理は実施していない

図 3.81 衝撃スパンごとにまとめた玉石の質量と速度ピーク振幅の関係

・ 衝撃点が遠くなるにつれ、鉄球質量～ピーク速度振幅値（平均）関係式の傾斜が緩く

なる傾向が見られる。

・ 衝撃高さと衝撃スパンによって傾斜係数（α）が変わる可能性が高いので、鉄球質量～ピーク速度振幅値（平均）の関係式を求めるには十分な留意が必要である。

⑤ まとめと今後への課題

相模原市内の鋼製横矢板の仮設防護柵で実施した実験から得られた知見などを以下に示す。

＜周波数特性＞

・ 土木研究所構内の仮設防護柵に存在した低周波の固有（自由）振動が、相模原市内の仮設防護柵ではあまり顕著ではなかった。土木研究所構内の仮設防護柵は、木製横矢板と鋼製横矢板がH形鋼で連結されているため、木製横矢板の固有振動がかなり影響しているものと考えられる。

・ 鋼製横矢板の場合、計測の対象周波数については、木製横矢板に合わせて200Hzより高い周波数帯を採用すればよい。

＜振幅特性＞

・ 土木研究所構内で実施した鋼製横矢板に関する実験は、振幅が飽和しているケースが多く，両者の単純比較は不可能であった。

・ 鉄球、玉石とも、衝撃スパン位置が遠くなる程、振動のピーク振幅は減衰している。

・ 4スパン程度離れた場所では、衝撃質量（エネルギー）とピークエネルギーの関係式の傾斜が緩やかになるという傾向が見られる。

・ 自動車走行時の振動は，概ね0.004Kine程度であることが判明しているが、これはノイズ除去用のフィルターを通していない場合である。木製横矢板での実験結果から提案された「200Hz～600Hz」のバンドパスフィルターを使用する場合には、0.004Kineよりかなり小さくなることが期待される。よって、質量が0.3Kg程度の玉石が4スパンから5スパン程度離れた鋼製横矢板に衝突しても、これによる振動をトリガーを検出できるものと考える。

(2) 加速度型振動計による実験結果

①周波数特性

周波数特性に関しては、以下の観点で加速度応答スペクトルの比較を行った。

- 土木研究所構内と現地の比較：地盤条件、構造の違い
- 衝撃材料の比較：鉄球、玉石
- 衝撃スパンの位置（距離）の比較：振動計取り付け位置のH形鋼から最大 4 スパン
- 振動計取り付け位置の比較：防護柵延長方向端部の斜面側、防護柵延長方向内部（端部から 5 スパン）斜面側、防護柵延長方向端部道路側の 3 箇所
- 振動源の比較：鉄球衝撃、交通振動

加速度応答スペクトルの比較にあたり、上記全ての比較条件を統一した観点で俯瞰するために、以下を基本データとした。

- **振動計設置位置：防護柵延長方向端部の斜面側**
- **衝撃位置：防護柵延長端部（スパン１）の１Ｃ**
- **衝撃材料・質量：鉄球２ｋｇ**

＜土木研究所構内の基礎実験と現地基礎実験の比較＞

図 3.82 は、土木研究所構内の基礎実験と現地基礎実験（相模原、鋼製横矢板）の加速度応答スペクトルを比較した結果である。両現場の各成分の、ピーク周波数が大きく異なっている。例えば Y 成分は、土木研究所構内では 250～300Hz 付近にピークがあるが、現地では 1,800Hz 付近にピークが認められる。一方で、X 成分については、現地では比較的高い帯域（2,500Hz）にピークが認められるが、土木研究所構内では明確なピークが認められない。このような周波数特性の違いは、設置場所（地盤条件）や構造が起因していると考える。

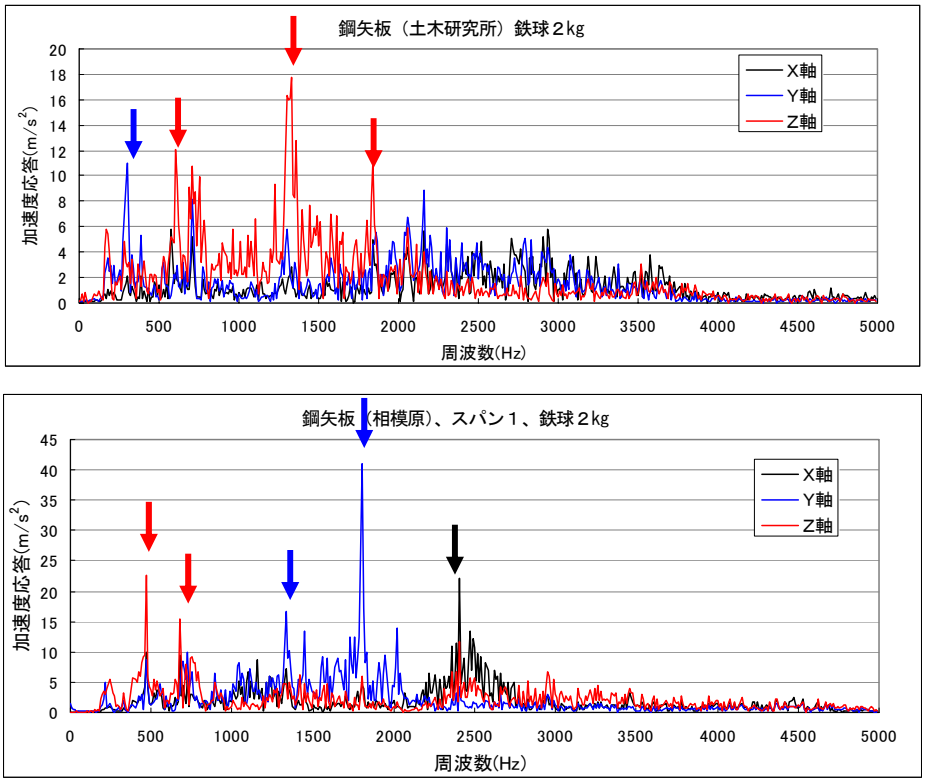


図 3.82　土木研究所構内の実験と現場実験の加速度応答スペクトルの比較

＜衝撃材料の比較：鉄球、玉石＞

図 3.83 は、鉄球と玉石の加速度応答スペクトルを比較した結果である。衝撃位置のずれ、ノイズの影響により衝撃によって励起されたスペクトルの周波数に若干ばらつきがあるものの、概ね卓越スペクトルの傾向は下記のとおり同様であると考える。

・矢板上下方向 X 軸：2,300～2,500Hz

・矢板水平方向 Y 軸：1,300～1,400、1,600～1,800Hz

・矢板垂直方向 Z 軸：400～500、700～800Hz

このことから、衝撃材料の違いは周波数特性に大きく影響しないものと考える。

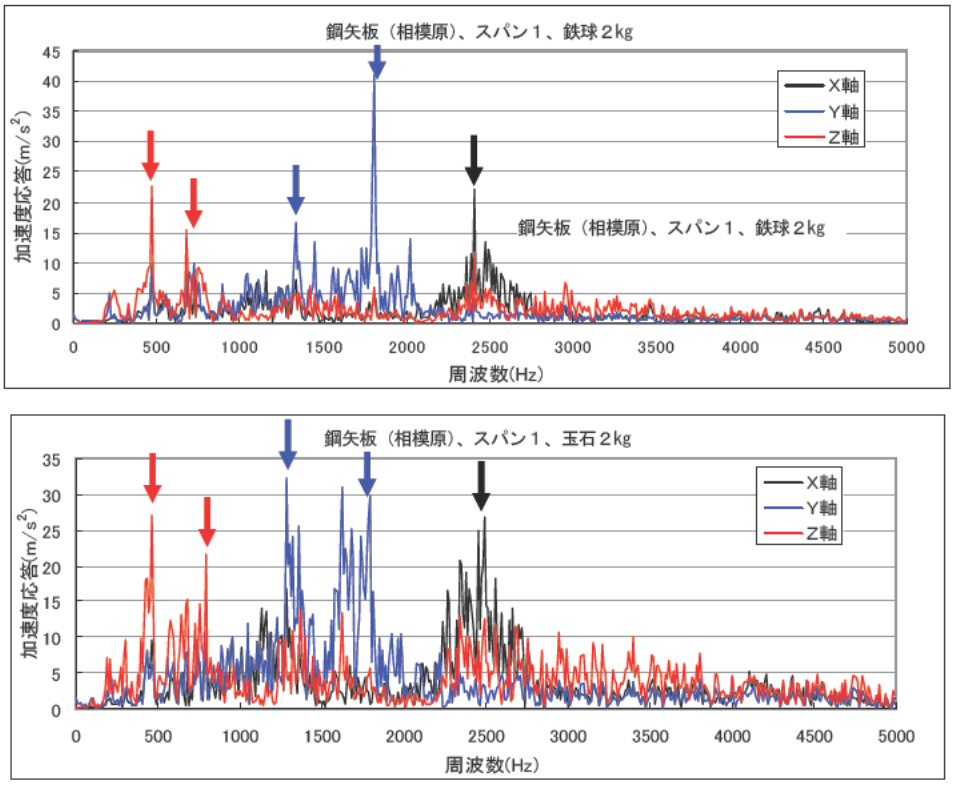


図 3.83　衝撃材料に着目した加速度応答スペクトルの比較（衝撃位置 1C）

＜衝撃スパンの位置（距離）の比較＞

図 3.84 は、衝撃スパンの位置を防護柵延長端部（スパン 1）から防護柵延長内部（スパン 5）へと、衝撃位置をセンサー設置位置から遠ざけた場合の加速度応答スペクトルを比較した結果である。衝撃位置のずれ、ノイズの影響により衝撃によって励起されたスペクトルの周波数に若干ばらつきがあり、不明瞭な部分はあるものの、概ね卓越スペクトルの傾向は下記とおり同様であると考える。

・矢板上下方向 X 軸：2,300～2,500Hz

・矢板水平方向 Y 軸：1,300～1,400、1,600～1,800Hz

・矢板垂直方向 Z 軸：400～500、700～800Hz

このことから、衝撃スパンの位置（距離）は大きく周波数特性に影響しないものと考える。

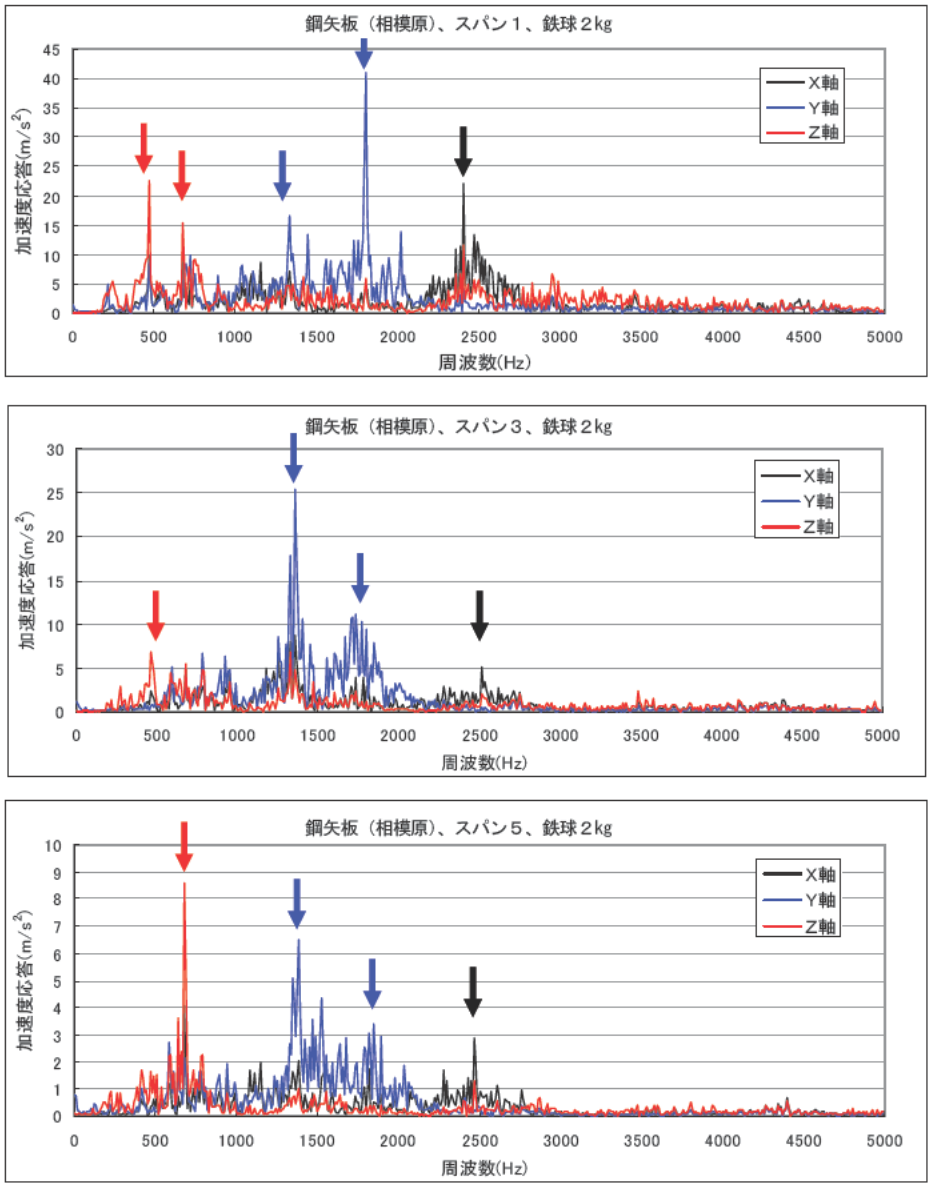


図 3.84　衝撃スパン位置に着目した加速度応答スペクトルの比較（衝撃位置 1C）

＜振動計取り付け位置の比較＞

図 3.85 は、振動計取り付け位置の違い（防護柵延長方向端部の斜面側、防護柵延長方向内部（端部から 5 スパン）の斜面側、および防護柵延長方向端部道路側）による加速度応答スペクトルを比較した結果である。衝撃位置のずれ、ノイズの影響により衝撃によって励起されたスペクトルの周波数に若干ばらつきがあり、不明瞭な部分があるものの、概ね卓越スペクトルの傾向は下記のとおり同様であると考える。

・矢板上下方向 X 軸：2,300～2,500Hz

・矢板水平方向 Y 軸：1,300～1,400、1,600～1,800Hz

・矢板垂直方向 Z 軸：400～500、700～800Hz

鋼矢板（相模原）、スパン１、鉄球２kg

このことから、振動計取り付け位置は大きく周波数特性に影響しないものと考える。

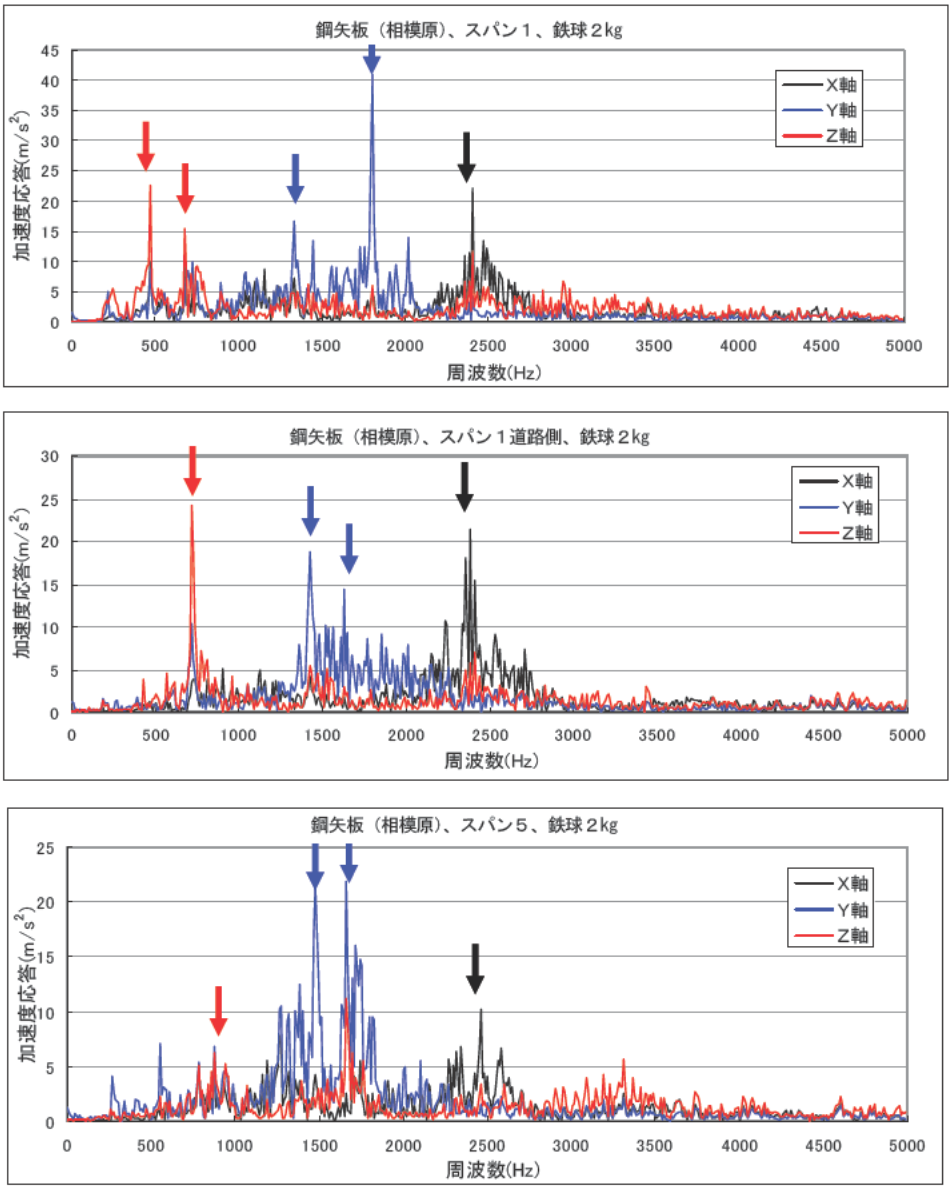


図 3.85　振動計取付位置に着目した加速度応答スペクトルの比較

＜振動源の比較＞

図 3.86 は、衝撃方法の違い（振り子方式（鉄球）と傾斜台（玉石））による加速度応答スペクトルの比較結果である。測定成分のうち、X、Y 成分で衝撃による振動と交通車両等の振動で、比較的高い周波数帯域（1,500Hz 以上）においてほぼ同じピーク周波数が認められる。一方で、1,000Hz より低い周波数領域では、図中点線で示したように、衝撃による振動が 400、700Hz にピーク周波数が認められるのに対し、交通車両等の場合は、150、800Hz 付近にピーク周波数が認められる。このように衝撃振動と交通車両の振動とは、ピーク周波数が異なることが認められる。

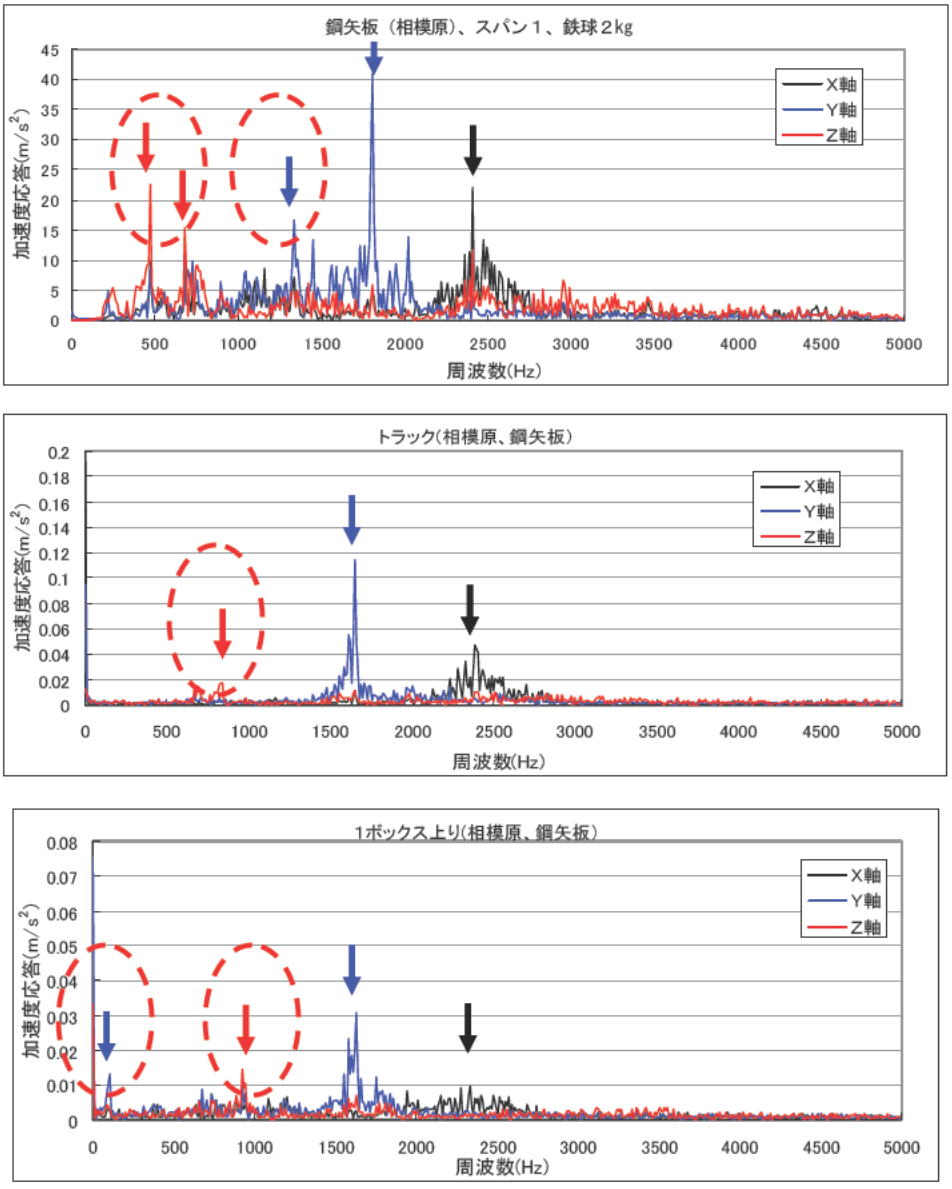


図 3.86　振動源に着目した加速度応答スペクトルの比較

ここで、図 3.87 に 1,000Hz 以下の低周波数帯域に着目した振り子方式（鉄球）や傾斜台（玉石）による衝撃実験と交通振動測定の加速度応答スペクトルの比較結果（矢板垂直方向の Z 軸）を示す。図を見ると、衝撃実験の場合 200～500Hz 付近に衝撃によって励起されたスペクトル成分が認められるが、同じ帯域での励起スペクトルは交通振動には顕著に認められない。したがって、本結果より、フィルタリングによって 200～500Hz の周波数帯域の波形データに着目すれば、落石のみの検知が行えるものと考える。

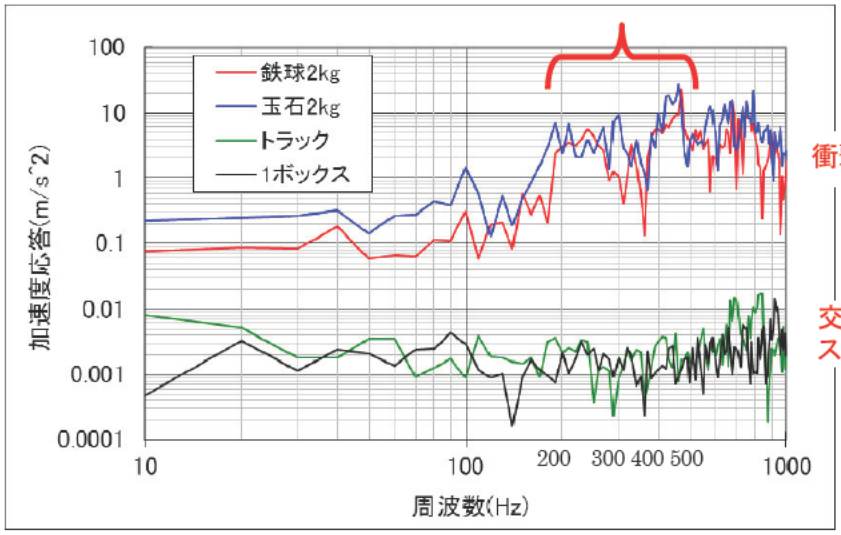


図 3.87　振動源に着目した加速度応答スペクトルの比較（1,000Hz 以下、Z 軸）

②振幅特性

図 3.88 は、振り子方式衝撃実験において、鉄球質量、衝撃高さの違いによる最大振幅を比較したものである。値のばらつきはあるが、図より次の点が明らかである。

・最大振幅の値は、衝撃材料の質量と概ね正の相関があると推察される。

・最大振幅の大きさは Z 軸＞X 軸＞Y 軸であり、土木研究所構内基礎実験と異なっている。

・衝撃高さの最大振幅の大きさは、1 段目＞2 段目＞3 段目（振動計取り付け位置（防護柵高 2 分の 1）から遠い順）であり、木製横矢板の仮設防護柵（藤岡市）（図 3.58 参照）と異なる。

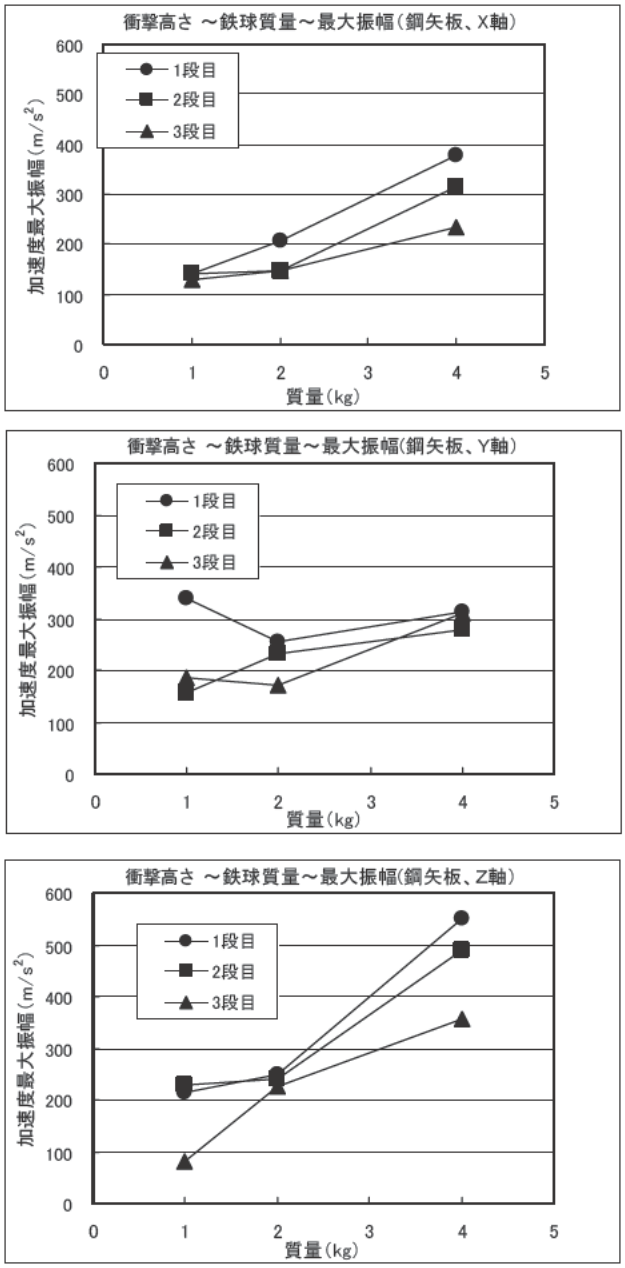


図 3.88　衝撃高さ、衝撃材料の質量の着目した最大振幅の比較

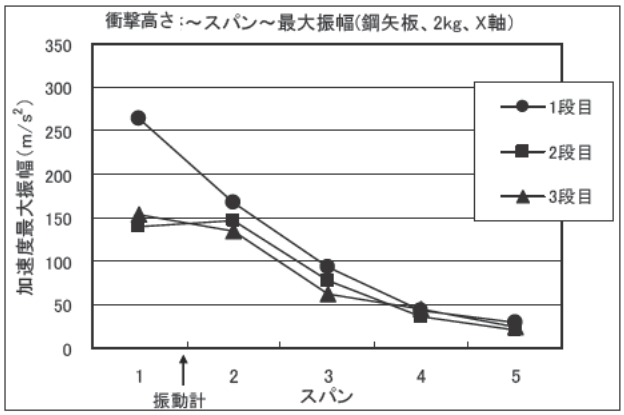
（衝撃材料：鉄球、衝撃位置：スパン 1）

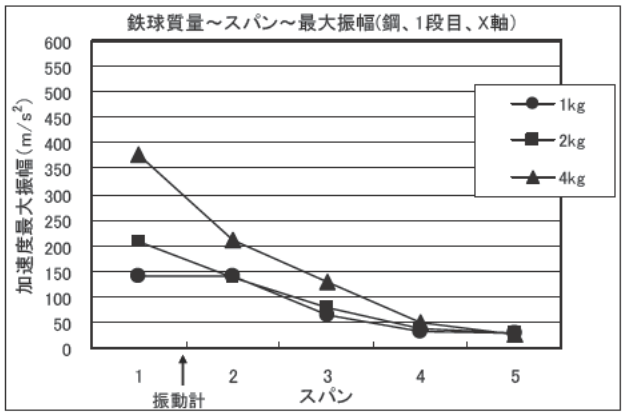
図 3.89 は、振り子方式衝撃試験において、衝撃高さ、衝撃スパン位置の違いによる最大振幅を比較したものである。図より次の点が認められる。

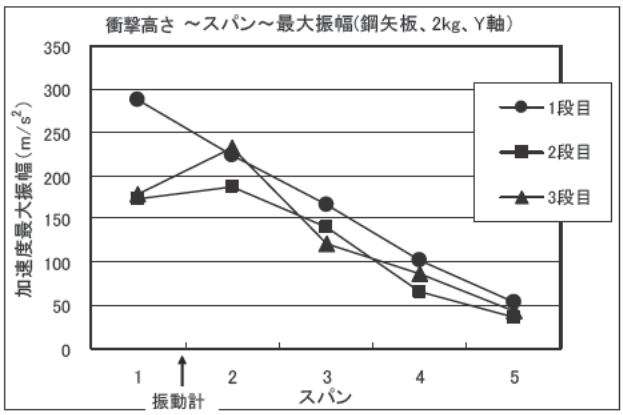
- いずれの測定方向、衝撃高さについても、衝撃スパン位置が離れることにより最大振幅が小さくなる（距離減衰する）。
- 振動計を取り付けた支柱の両側スパン（スパン 1 およびスパン 2）については、衝撃高さによる最大振幅の大きさは 1 段目＞2 段目＞3 段目（振動計取付位置（防護柵高 2 分の 1）に近い順）といった傾向にある。しかし、スパン 3 以降になると、衝撃高さによる最大振幅の大きさに明瞭な違いは小さくなる。

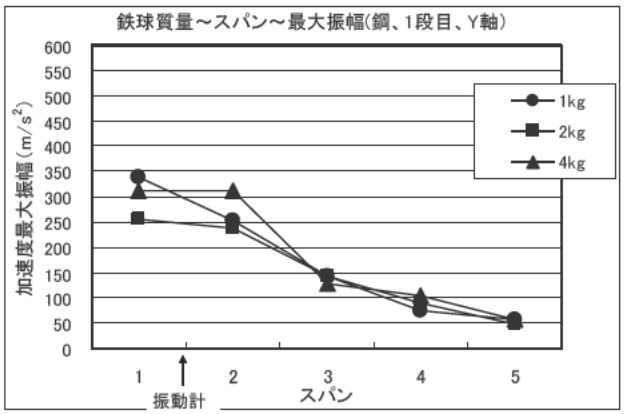
図 3.90～図 3.92 は、振り子方式衝撃試験において、鉄球質量と衝撃スパン位置の違いによる最大振幅を衝撃高さ毎に整理したものである。各衝撃高さいずれにおいても最大振幅の距離減衰が認められる。しかし、図より次の点が明らかである。

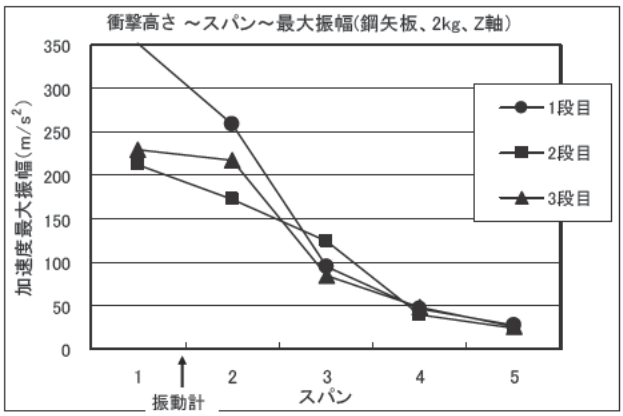
- 振動計設置高さに比較的近い 3 段目の衝撃の場合、1 段目、2 段目の衝撃に比べて、スパン 2 からスパン 3 への振幅の減衰割合が大きい。さらに、大きな質量による衝撃時にその傾向が大きい（すなわち、図 3.92 に示すようにスパン 3 を挟んだ減衰曲線の屈折の程度が大きい）。











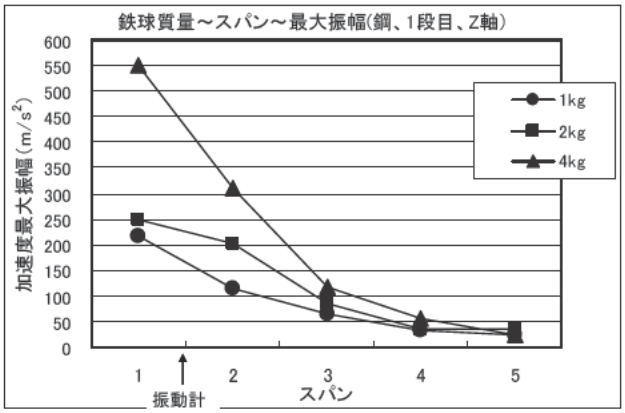
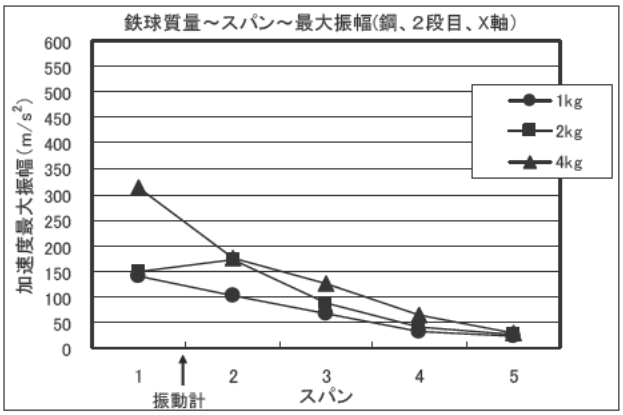
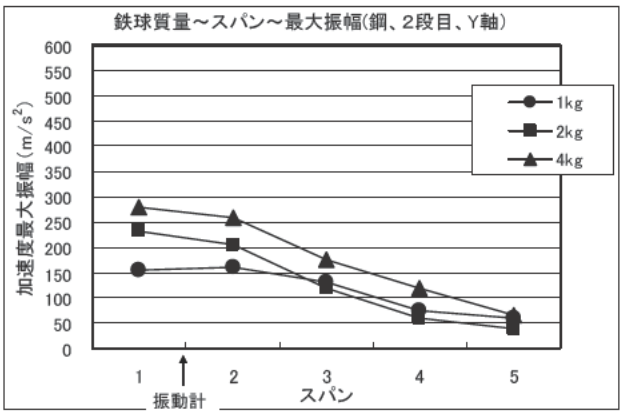


図 3.89　衝撃高さ、衝撃スパン位置に
着目した最大振幅の比較
（振幅値：横矢板衝撃箇所 B～D の平均値）

図 3.90　衝撃材料の質量に着目した
最大振幅の比較
（鉄球、衝撃高さ１段目）





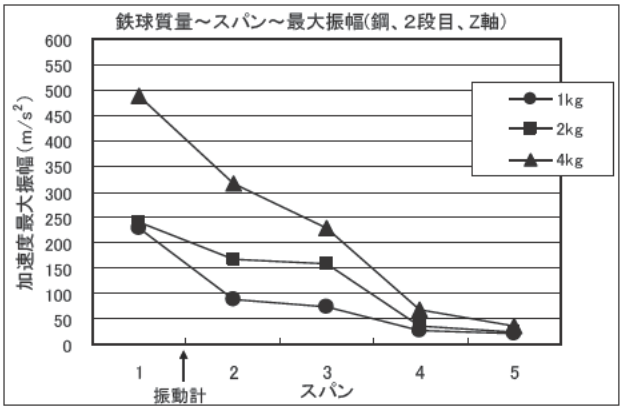
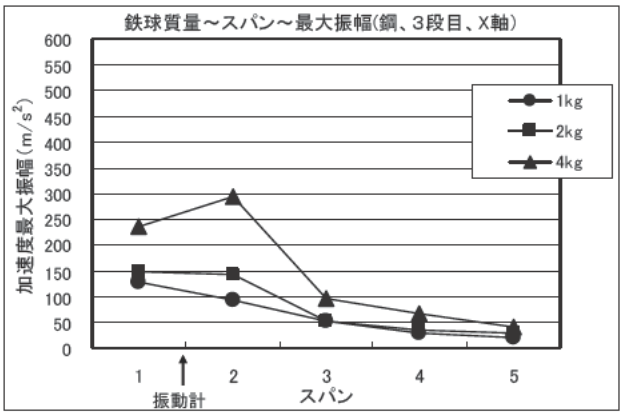
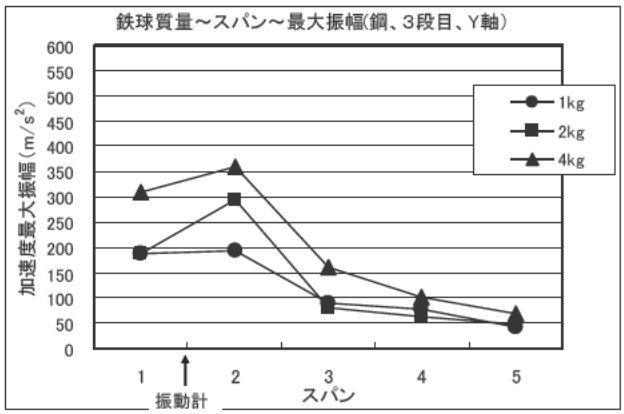


図 3.91　衝撃材料の質量に着目した
最大振幅の比較
（鉄球、衝撃高さ２段目）





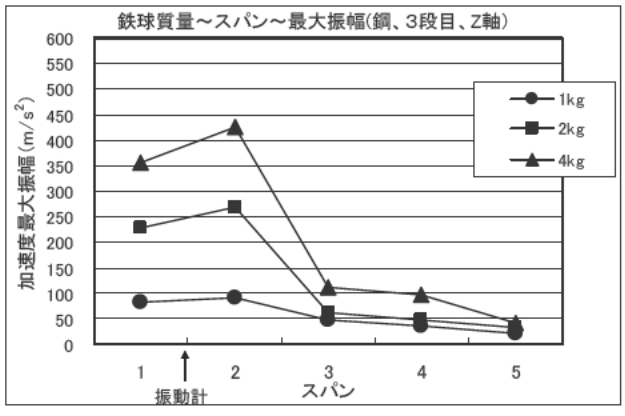


図 3.92　衝撃材料の質量に着目した
最大振幅の比較
（鉄球、衝撃高さ３段目）

図 3.93 は、衝撃方法の違い（振り子方式（鉄球）と傾斜台（玉石））に着目し、質量の違いによる最大振幅を比較したものである。鉄球と同様に玉石による衝撃についても、最大振幅の距離減衰が認められる。

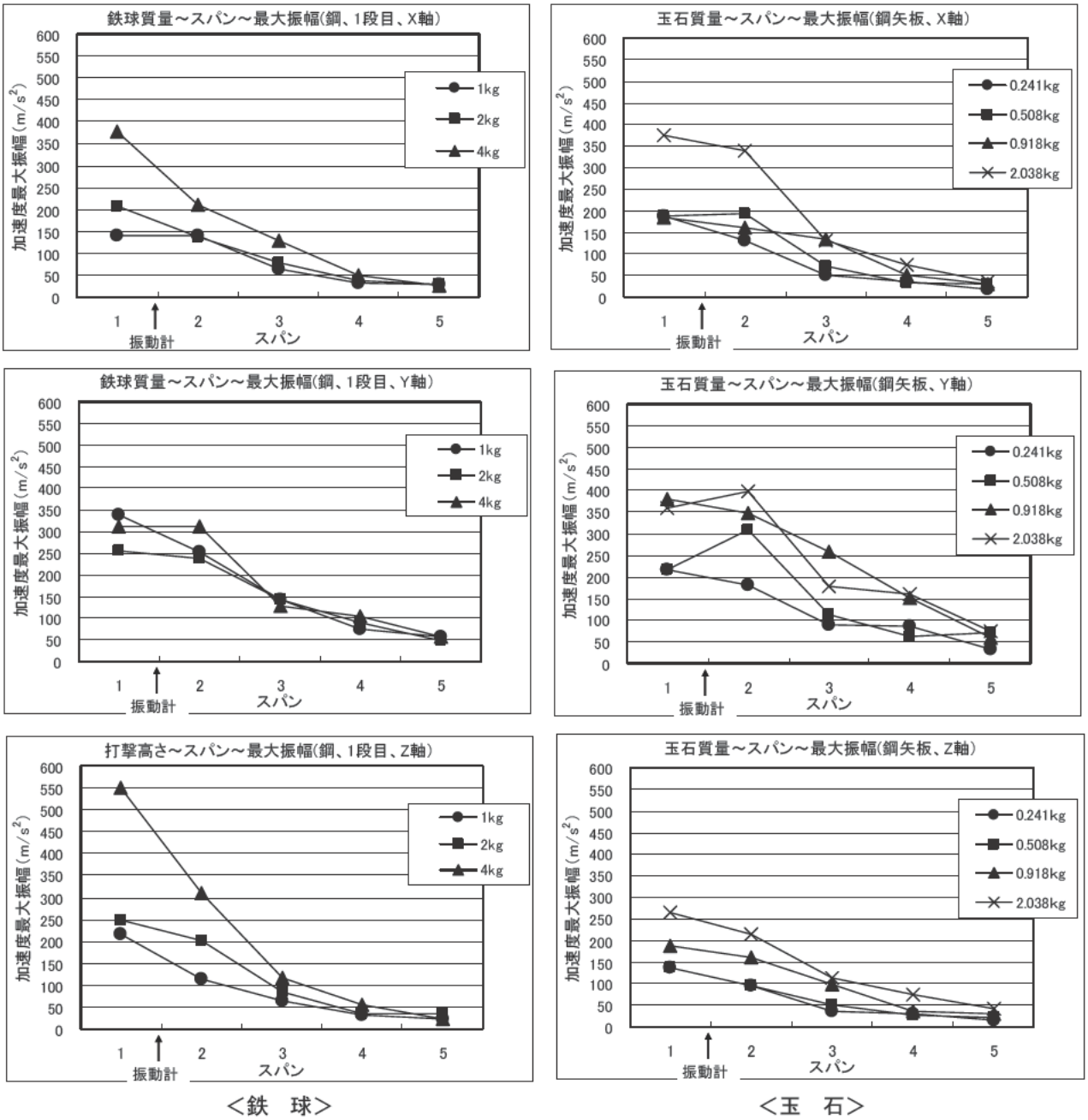


図 3.93　衝撃材料の違い、質量に着目した最大振幅の比較
（横矢板衝撃箇所 C（中央）、衝撃高さ 1 段目）

図 3.94 は、仮設防護柵に隣接した道路を通行する交通車両起源の振動による最大振幅をまとめたものである。図より、次の点が認められる。

- 交通車両等による最大振幅は、鉄球等による衝撃実験と異なり、Y 軸>X 軸>Z 軸である。
- 交通車両による最大振幅は 0.6m/s² 以下であり、スパン 5 までの鉄球等による衝撃実験の最小値（15.12m/s²）よりも小さい値であった。このことは、落石などの崩落時の振幅のしきい値を 0.6m/s² 以上に設定しておけば、交通車両による振動には感知しない可能性を示すものであると考える。

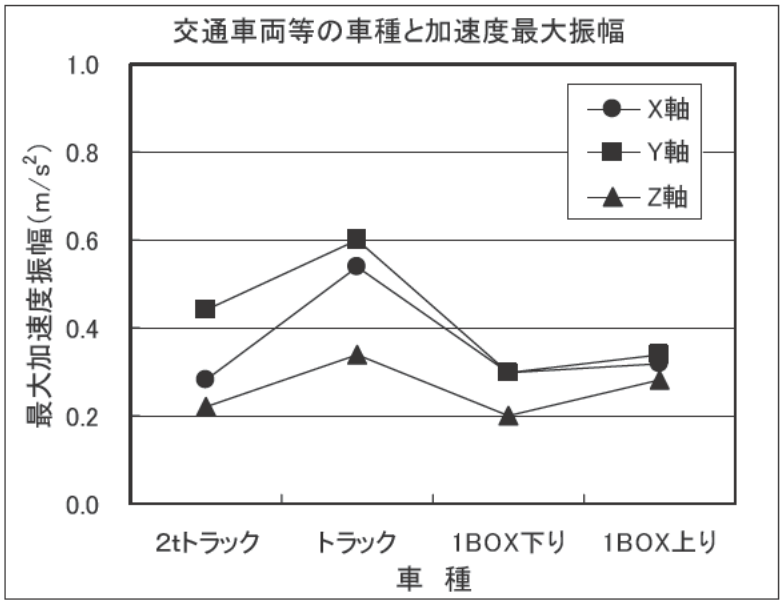


図 3. 94　交通車両等の車種に着目した最大振幅の比較

③まとめ

現地の鋼製横矢板の仮設防護柵の実験結果より得られた主な知見は以下のとおりである。

＜周波数特性＞

- 土木研究所構内と現地との加速度応答スペクトルの結果から、同じ材料による仮設防護柵でも設置場所（地盤条件）や構造の違いによって周波数特性が大きく異なることが明らかとなった。
- 現地での加速度応答スペクトルを比較した結果、衝撃材料、衝撃スパン位置、振動計取り付け位置の違いによって、周波数特性は影響を受けないことが認められた。
- 交通振動による振動と鉄球等の衝撃による振動のピーク周波数を比較すると、高い周波数領域（1,500Hz 以上）では同じ帯域に分布するが、それよりも低い周波数帯域では明確に異なることが明らかとなった。

＜振幅特性＞

- 加速度振幅の最大値が出現する測定成分が、土木研究所構内での基礎実験と現地基礎実験で異なることが認められた。
- 振動計の設置位置から衝撃スパン位置が遠ざかるにつれて、最大振幅は低減（距離に応じて減衰）する。
- 振動計を設置したH形鋼両側スパンよりも離れたスパンの最大振幅は、衝撃高さや衝撃質量（エネルギー）による差は明瞭でない。
- 交通車両による最大振幅は 0.6m/s^2 以下であり、スパン 5 までの鉄球等による衝撃実験の最小値（15.12m/s^2）よりも小さい値であった。このことは、落石などの崩落時の振幅のしきい値を 0.6m/s^2 以上に設定しておけば、交通車両による振動には感知しない可能性を示すものであると考える。

3.3　検知センサーに要求される性能

3.3.1　基礎実験で確認できたこと

(1) 速度型振動計による実験結果

- 土木研究所構内の基礎実験と現地基礎実験の比較結果により、速度型振動計による仮設防護柵の周波数特性は、木製横矢板の場合はほぼ同一であるといえるが、鋼製横矢板の場合は土木研究所構内の仮設防護柵の設置条件が特殊であったため、結論を出すに至っていない。

- 土木研究所構内の基礎実験と藤岡市内の木製横矢板での現地基礎実験から、仮設防護柵の固有振動（自由振動）は 20Hz～40Hz にピークが存在するものの、概ね 60Hz 程度から高周波数側では減衰することが確認できた。相模原市内の鋼製横矢板での基礎実験から、仮設防護柵の固有振動（自由振動）も概ね 60Hz より低いことが確認された。

- 自動車の走行振動で特徴的なのは、木製横矢板で 90Hz 前後、鋼製横矢板で 100Hz 前後にピークが検出されていることである。何れの矢板共，これらの周波数の約 2 倍の成分波も存在することから、走行振動自体あるいは仮設防護柵を構成する部材の固有振動である可能性が考えられる。この成分波は、質量の小さい落石を検知の対象にする場合には、検知レベル（しきい値）の設定が困難になる可能性がある。よって、自動車走行に伴う 90Hz 前後ないしは 100Hz 前後の成分波を適切に除去する必要がある。

(2) 加速度型振動計による実験結果

- 土木研究所構内の実験と現地実験の仮設防護柵の周波数特性に違いが見られた。この原因は、設置場所の地盤条件の影響や構造の微妙な違いが考えられる。

- 現地の仮設防護柵の振り子方式や傾斜台を用いた衝撃試験結果により、衝撃材料（鉄球、玉石）、衝撃位置、振動計の取り付け位置が違っても、衝撃振動の周波数特性は大きな影響を受けず、ピーク周波数はほぼ同じ傾向にあること。このことは、防護柵の周波数特性を確認する際の衝撃材料は鉄球使用が可能であり、振動計取り付け位置や衝撃場所も周波数特性の観点からは、特に場所を選ぶ必要がないと考えられる。

- 現地実験の結果から、鉄球等の衝撃振動と交通振動のピーク周波数は、比較的高い周波数領域（木製横矢板で 1,000Hz 以上、鋼製横矢板で 1,500Hz 以上）では、ピーク

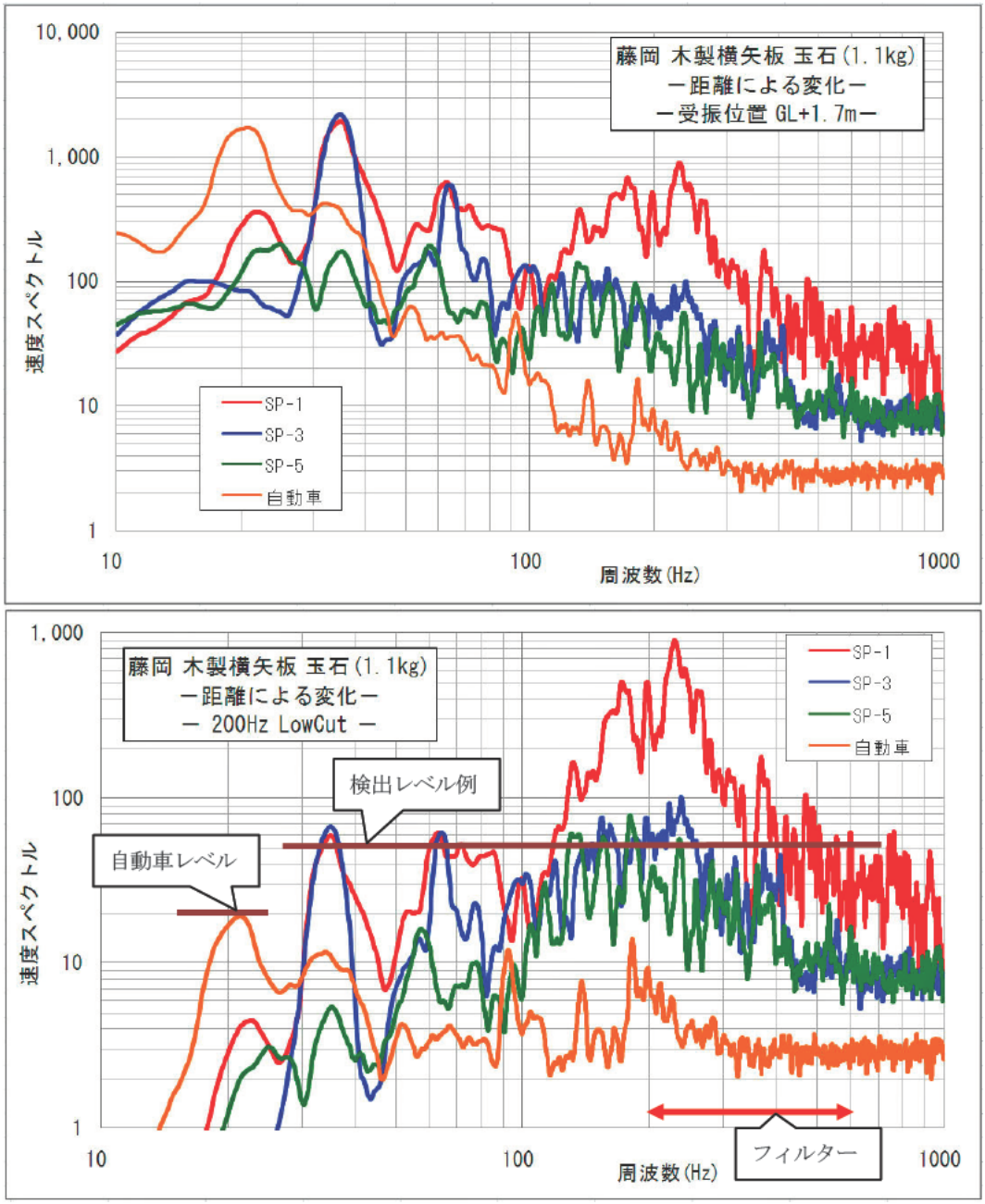
周波数がほぼ同じ傾向にあるが、比較的低い周波数帯域（木製横矢板で1,000Hz以下、鋼製横矢板で1,500Hz以下）では、落石等の衝撃振動と交通振動のピーク周波数が異なる結果となった。特に鉄球等の衝撃振動については、木製、鋼製いずれも200～500Hz付近の周波数帯域で交通振動では見られないスペクトルの応答が確認できた。このことから、この概ね200～500Hzの周波数帯域においてフィルターを用いた崩落検知方法が利用できるものと考える。

・ 落石等の衝撃振動による最大振幅の値は、今回の振動測定でカバーした測定範囲（振動計設置箇所から防護柵延長方向5スパンまでの範囲）については、交通振動による最大振幅に比べて大きいことが認められた。すなわち、交通振動による振幅レベルと防護柵延長方向の振幅の減衰特性を考慮し、落石時の衝撃振動による振幅レベルのしきい値設定が適切にできれば、最大振幅のみで落石による衝撃振動を検知することも可能と考えられる。

3.3.2　検知センサーの性能

(1) 速度型振動計による検知センサーの性能

基礎実験で確認されたように、木製横矢板では自動車が走行することによって、防護柵の固有振動（自由振動）が 20Hz～40Hz に検出されると共に、90Hz 前後の振動も検出されているため、これらを適切なバンドパスフィルターで除去する必要がある。



上段：ローカットフィルター処理前。　下段：ローカットフィルター処理後

図 3.95　200Hz のローカットフィルターの効果（シミュレーション）

鋼製横矢板の場合は、低周波帯域の固有振動はかなり低減されているものの、100Hz 前後の成分波はノイズとしてかなりの振幅を示しているため、やはり除去した方が良い。

図 3.95 は、その効果を確認するためのシミュレーション結果である。

200Hz のローカットフィルター処理の前後であって、「SP-5」での鉄球衝突や自動車の走行によって励起された低周波数の固有振動（自由振動）と、自動車走行振動自体がかなり低減された結果、S/N 比がかなり改善されていることが分かる。

一方、鋼製横矢板の場合は、衝突時振動の振幅に比べて固有振動（自由振動）の振幅は小さいが、自動車の走行振動に伴う 100Hz の成分波自体は存在するため、木製横矢板と同様のフィルターを使用することが望ましい。

以上により、計測システムを含む検知センサーに「200Hz～600Hz」のバンドパスフィルターを組み込むことにした。

ローカットの周波数であるが、藤岡市と相模原市での基礎実験だけでは、あらゆる事態を正しく把握していない可能性がある。

ハイカット周波数を設定する理由は、「雷（空電）ノイズ」のようなパルスノイズを低減するためであるが、実際に検知センサーに実装する周波数については、今後実施される長期間の実験計測の結果などを参考にして決定したいと考えている。

以上をまとめ、現段階で想定される検知センサーの要求性能を表 3.3 に集約した。

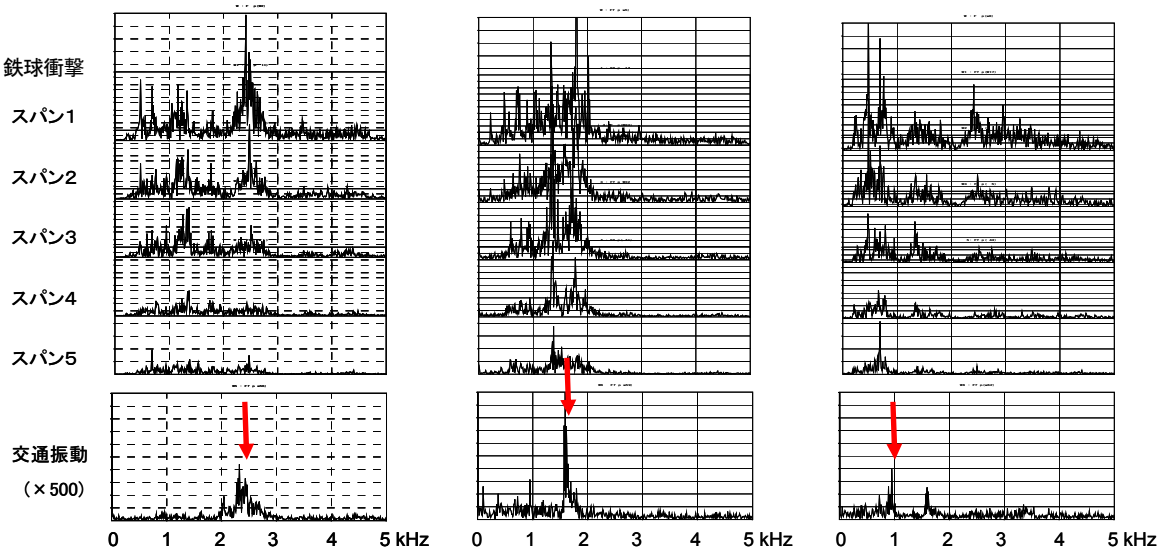
表 3.3 速度型振動計を使用した検知センサーの要求性能（案）

種 類	概 略 仕 様	備 考
センサー	F0=14Hz　MC 型地震計（速度型振動計）	F0=28Hz 可
計 測 器	周波数特性： 10Hz～1KHz ローカット： 200Hz（On/Off 切換） ハイカット： 600 Hz（On/Off 切換） しきい 値 ： 0.005Kine～0.1Kine（手動可変）	
A/D 変換	分 解 能 ： 14Bit 以上 サンプリング：2KHz	波形記録

(2) 加速度計による検知センサーの性能

2 章で述べたように、振動計利用を前提とした検知センサーの性能は、A/D 変換器の性能に負うところが大きい。すなわち、落石衝撃といった比較的高い周波数帯域の振動を周波数に着目して区別するには、高速サンプリング機能をもつ A/D 変換器の利用が必要となる。しかし、高速にサンプリング可能な A/D 変換器を備えるセンサーは一般的に高価になる傾向がある。したがって、なるべく低い周波数帯域で区別できることが、コストパフォーマンスの高い検知センサー開発の重要な要素といえる。この点について、今回の実験データを踏まえ検証する。

図 3.96 に鋼製横矢板の仮設防護柵の代表的な鉄球衝撃、交通振動の加速度応答スペクトルを示す。交通振動のスペクトルを見ると、卓越周波数は、図中に示すとおり、X 成分で 2.3kHz、Y 成分で 1.6kHz、Z 成分で 0.9kHz である。鉄球衝撃波形のスペクトルには、これより高周波数および低周波数の成分が含まれている。とくに Z 成分には、1kHz 以下の低周波数成分が多い。このような広い周波数帯域でのスペクトルの特徴から、鉄球衝撃（落石）と交通振動を区別することは可能と思われるが、高速サンプリング機能をもつ A/D 変換器が必要となり、検知センサーが高価になる。



1－C　X 成分　　1－C　Y 成分　　1－C　Z 成分

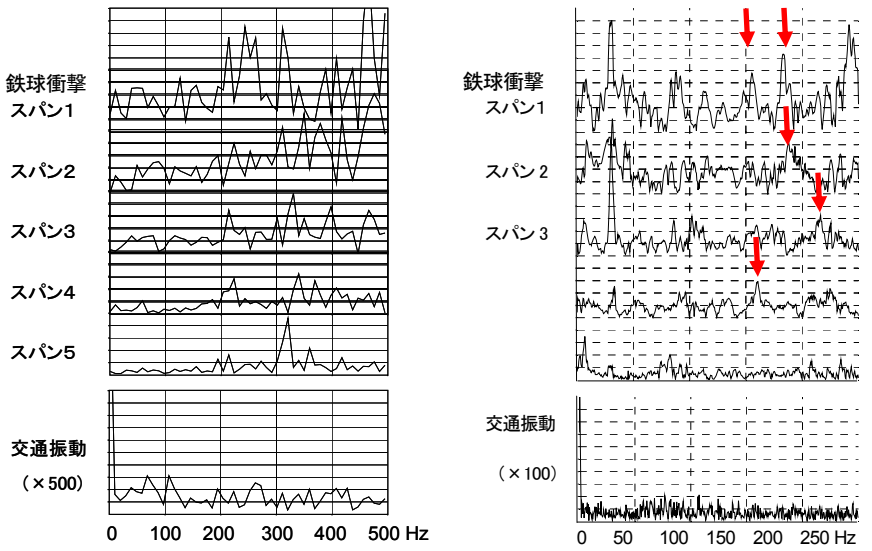
図 3.96　鋼製横矢板（相模原）鉄球 2kg、衝撃後 1 秒間の波形のスペクトルと交通振動 1 秒間のスペクトル（記録 455）

そこで、サンプリング周波数 1kHz および 500Hz の“比較的安価な A/D 変換器を用いた”と想定し、データの 2 つのサンプリング周波数に応じて間引きをした波形を作成し、FFT 解析による応答スペクトルを整理した。整理結果を図 3.97 に示す。

1kHz の応答スペクトルを見ると、鉄球衝撃では 200Hz 以上で振幅が比較的大きい特徴があるが、交通振動では卓越する周波数帯が見られない。また、交通振動の振幅は、鉄球衝撃に比べて 1/100 以下である。1kHz で収録されたデータに例えば 200Hz のハイパスフィルターを適用し、適当な振幅しきい値を設定すれば、落石の判別は可能と考える。

一方 500Hz でも、200～250Hz 付近(図中赤矢印)で鉄球衝撃の卓越スペクトルが見られるが、衝撃スパンが離れると伝播する振動エネルギーが減衰し、振幅が小さくなるので、1kHz と同じようなスペクトルの明瞭さはない。ただし、この場合でも、交通振動の振幅レベルが鉄球衝撃に比べ 1/100 以下であるので、200Hz 以上の周波数に着目したフィルターと振幅しきい値を組み合わせれば、落石判別はかろうじて可能であると考える。ただし、500Hz 以下のサンプリング周波数の場合は、周波数のみでの落石判別は困難であることが考えられる。

以上のように、今回の基礎実験を踏まえ、加速度計を用いた落石検知にはサンプリング周波数が 500Hz 以上の A/D 変換機能を有するセンサーの適用を前提とする。



サンプリング周波数 1kHz　　サンプリング周波数 500Hz

図 3.97　間引き後の鉄球衝撃、交通振動の加速度応答スペクトル

4. 検知センサーの長期検証実験

4.1 実験目的

平成 21 年度に行った一連の基礎実験（土研構内実験および 2 箇所の現地基礎実験）の成果を踏まえ開発した斜面の崩落検知システムについて、事前基礎実験ならびに検証実験を行った。

本実験の主な目的は、次のとおりである。

（1）事前基礎実験

- 長期検証実験のために設置した仮設防護柵の基本的な振動特性や、センサー設定条件に関するデータ（周波数特性、最大振幅の距離減衰など）の把握。
- 平成 21 年度に実験対象とした仮設防護柵との振動特性の比較（既往の実験結果との比較）。

（2）検証実験

- 開発した崩落検知センサーを実際の崩落危険箇所の斜面に設置した仮設防護柵に取り付け、設置期間中に発生した落石・小崩落現象やその他の事象のモニタリングを通して、崩落検知センサーに求められる確実性、安定性、耐久性、および信頼性などを検証すること。
- 落石や斜面崩落の前兆現象の有無や崩落形態・規模を調べることで、崩落に対する警戒に必要なしきい値の設定などの崩落検知システムの構築に必要な知見を得ること。

以下に、実験場所、仮設防護柵の概要ならびに各実験結果等について報告する。

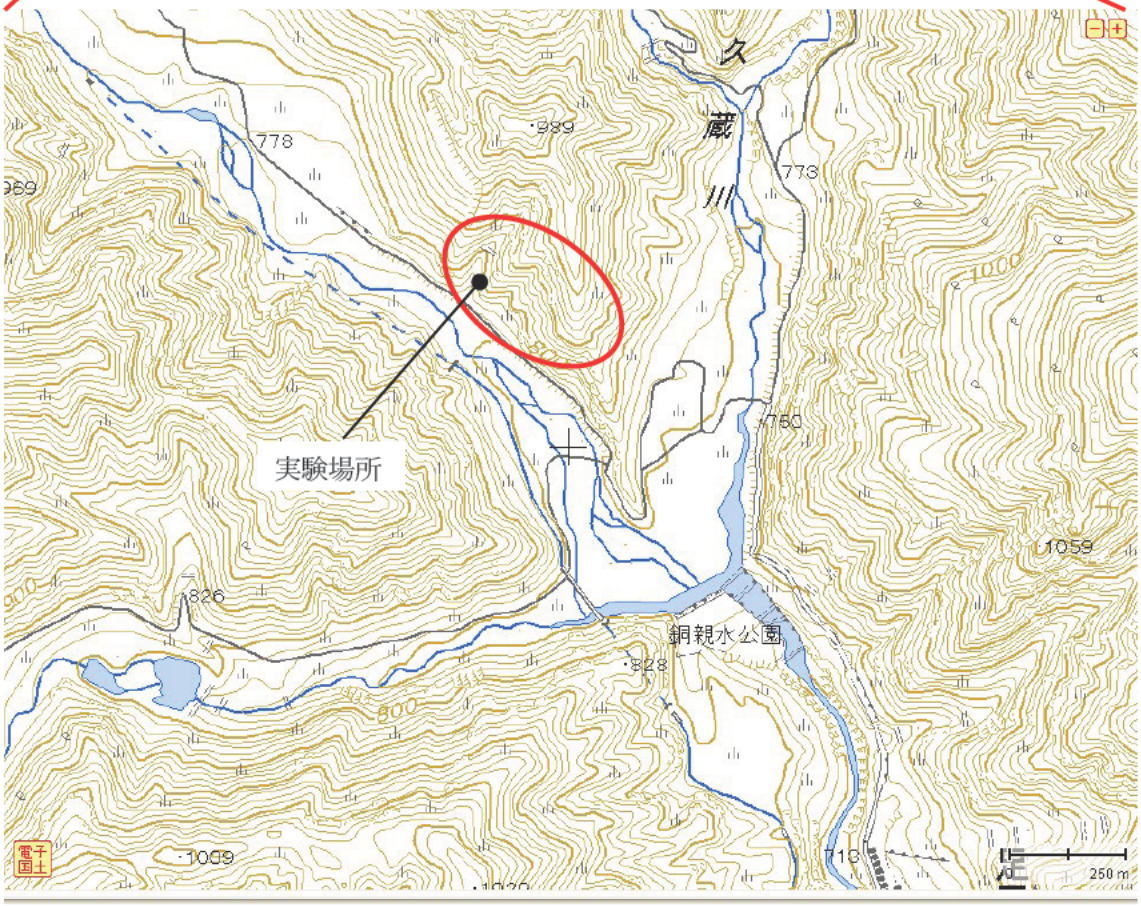
4.2 実験場所、仮設防護柵の概要

4.2.1 実験場所

本実験場所は、国土交通省関東地方整備局渡良瀬川河川事務所の砂防事業区域である松木山腹工区域内、中禅寺湖の南南西約 5km の栃木県日光市足尾町内で、山腹工が実施されている松木川左岸斜面に設けた（図 4.1）。

仮設防護柵の設置場所は、写真 4.1、4.2 に示すように、開口亀裂が全体的に発達し、落石発生の可能性が高い、砂防堰堤脇の急崖下の平場（写真で赤点線の箇所）とした。

※Google Map より引用した



※国土地理院 電子国土より引用した

図 4.1　実験場所位置図

写真 4.1　実験場所の状況（松木川からの正面写真）

写真 4.2　実験場所の状況（北側斜面からの側面写真）

4.2.2　仮設防護柵の概要

実験に用いた仮設防護柵の諸元は下記のとおりである。また、詳細図を図 4.2 に示す。

(1) 仮設防護柵の諸元

・高さ×延長（m）：4.0m×10.0m

・支柱（mm）　　：H 形鋼　150×150×7×10

・横矢板（mm）　：軽量鋼製横矢板　LSP-Ⅰ型　板厚 t=4.0　板幅 W=250

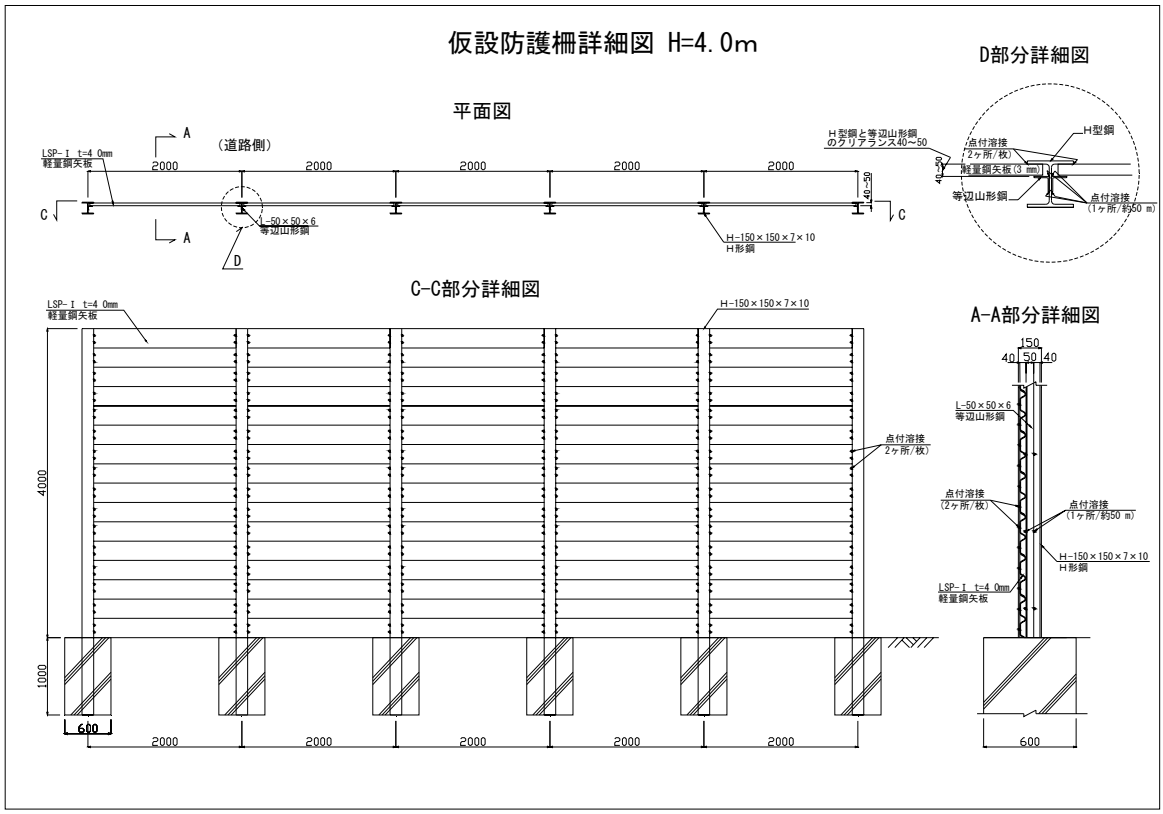


図 4.2　仮設防護柵詳細図

(2) 諸元の決定理由

「2.2.2 **既往の設置事例調査結果**」より、支柱部材は H 形鋼を選定した。また、最も事例の多い支柱高さ（4.0m）及び支柱間隔（2.0m）とし、土留材は、事例の多い鋼製横矢板を 1 スパンずつ設置することとした。

(3) 仮設防護柵設置工事の概要

①工事数量

表 4.1　使用資材一覧表

名　称	規格・寸法	数量	備　　考
H 形 鋼	H-150×150×7×10　L=5.0m	6 本	
横 矢 板	軽量鋼製横矢板　LSP-Ⅰ　L=2.0m	80 枚	
固定金物	等辺山形鋼　L-50×50×6　L=4.0m	10 本	
コンクリート	高炉セメント B　18-8-40BB	2.5 ㎥	

②施工フロー

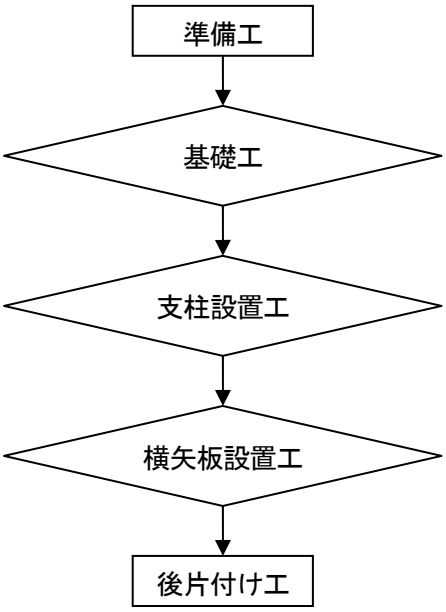


図 4.3　施工フロー

なお、基礎 6 箇所のうち谷側（斜面を見て左側）の 4 箇所はタンパを用いて締固めを行って基礎を構築し、残りの 2 箇所（斜面に向かって右側 2 箇所）は岩の上に基礎を構築した。

写真 4.3　防護柵設置完了（正面）

写真 4.4　　防護柵設置完了（側面）

4.3 事前基礎実験

4.3.1 実験計画

本実験は、平成 21 年度と同様の基礎実験を実施した。以下に実験の計画内容を示す。なお、本実験で使用するセンサー等は本実験後に行う長期検証実験でも使用する。センサーの詳細については、4.4.2（2） を参照されたい。

事前基礎実験の計画内容

- 仮設材を使用して、図 4.4 に示す振り子方式実験台を設営する。
- 振り子方式により鉄球を用いて、背面側に一定の衝撃エネルギーを与える。
- エネルギーの違いによる振動特性の変化を確認するため、高さ 0.5m から質量 m=1、2、4kg の鉄球を落下し、E=4.9、9.8、19.6J の 3 とおりの衝撃エネルギーを与える。
- 衝撃位置は、部材や衝撃を与える位置の違いによる振動特性の変化や振動の減衰程度を確認するため、図 4.5 に示すとおり、一定間隔のメッシュ交点とする。

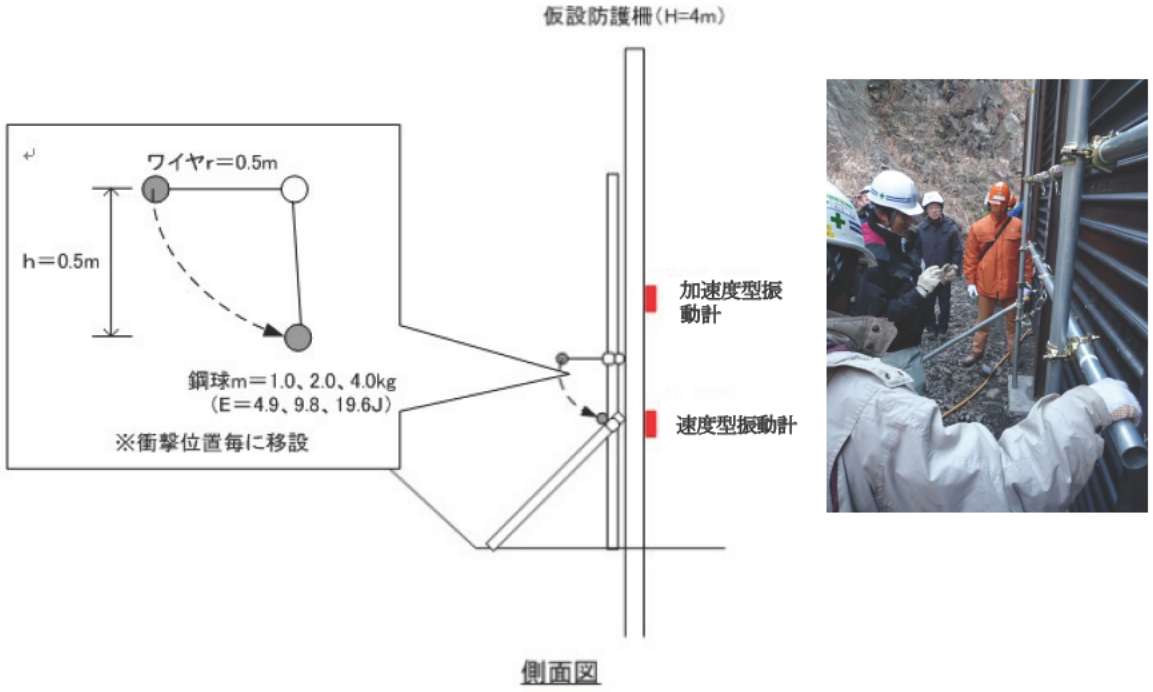
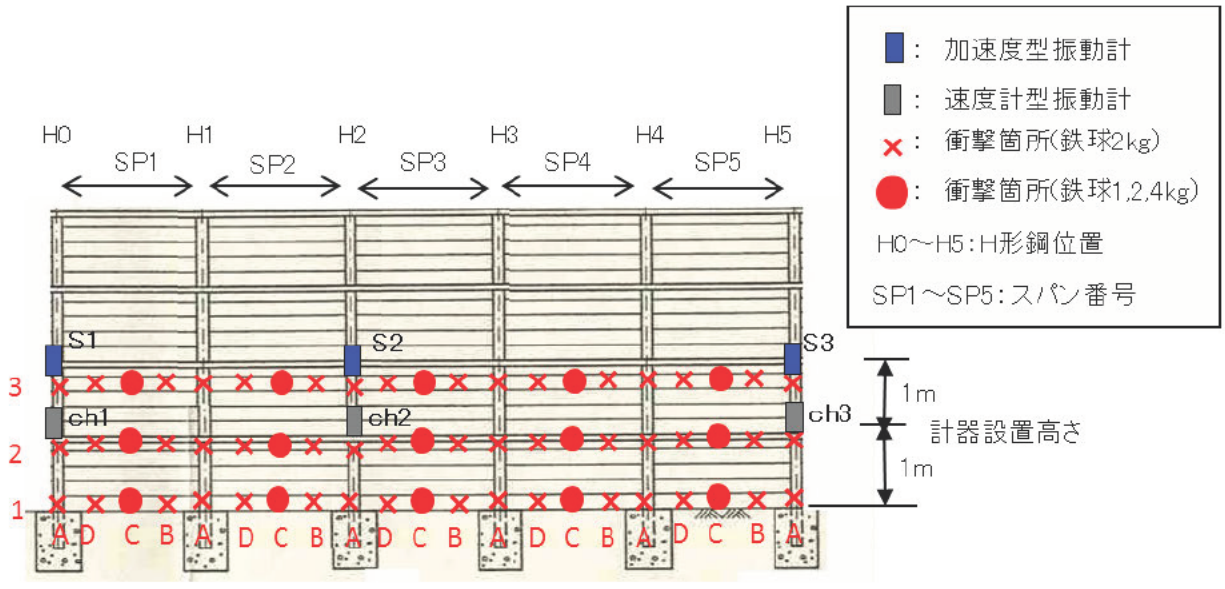


図 4.4　事前基礎実験概要図



（高さ位置　1：横矢板 1 段目、2：横矢板 3 段目、3：横矢板 5 段目）

図 4.5　鉄球衝撃位置図

4.3.2　実験結果

(1) 速度型振動計による実験結果

全ての衝撃波形に、200Hz～600Hz のデジタルバンドパス（B.P.）フィルターを適用した。

① 衝撃波形の例

図 4.6 に質量 1kg の鉄球を「SP-1」の「3 段目」の「C（中央部）」に衝突させた時に記録された振動波形を示す。上部から ch1（斜面側に向かって左端部の H 形鋼）、ch2（同じく左端部から 3 本目の H 形鋼）、ch3（同じく右端部の H 形鋼）及び ch4（岩盤に設置）である。

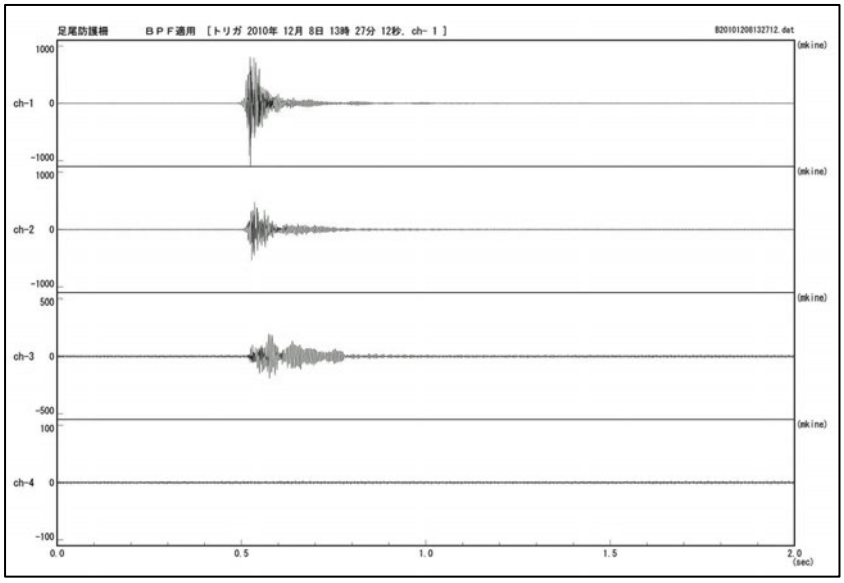
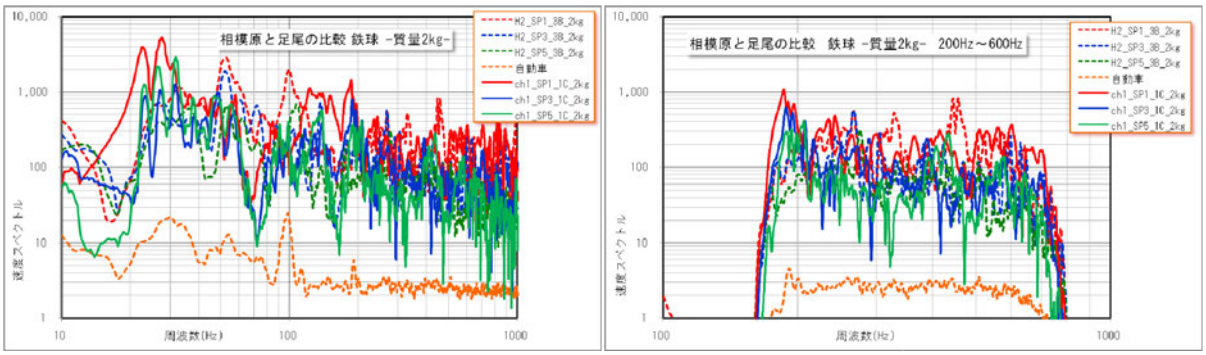


図 4.6　鉄球衝撃による速度波形例（衝撃箇所：SP1、3C）

② 周波数特性

（ｉ）相模原の仮設防護柵との比較及び B.P. フィルターの効果

図 4.7 は、前年度の基礎実験を実施した相模原市内の仮設防護柵（鋼製横矢板）と、今回実施した足尾仮設防護柵での各速度スペクトルを比較した結果である。



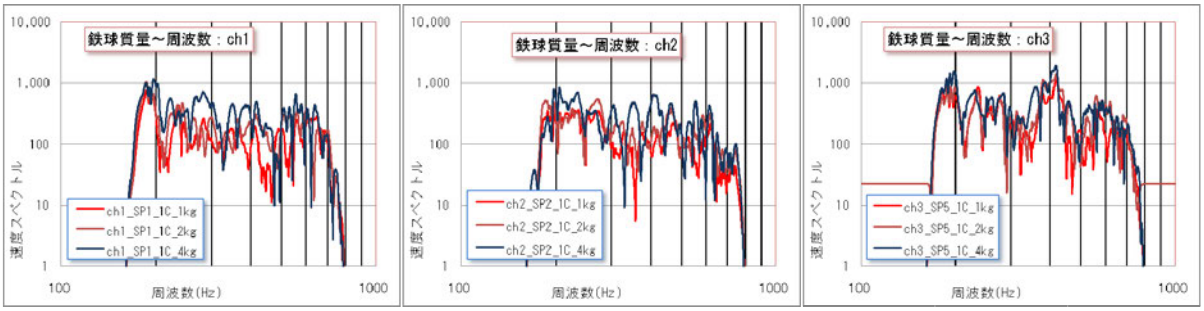
H2_SP1～SP5：相模原（鉄球 2kg）。　自動車：相模原。　図左：B.P.フィルター無し

図 4.7　相模原仮設防護柵と足尾仮設防護柵の速度スペクトルの比較

・ 両者とも 200Hz～600Hz の範囲において、自動車の走行振動に比べて 10 倍程度大きな振幅を示しており、落石を検知できる振動エネルギーを保有していることが判明した。

（ⅱ）鉄球質量（衝撃エネルギー）による変化

図 4.8 は、鉄球質量（衝撃エネルギー）に着目して速度スペクトルを比較した結果である。



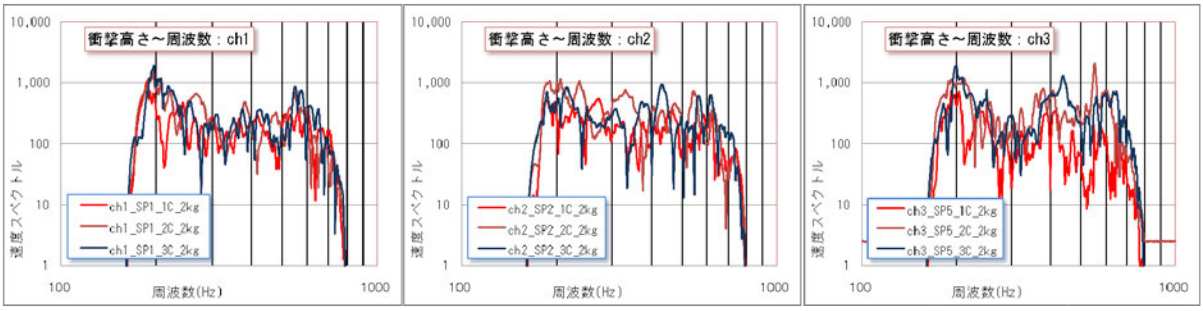
ch1～ch3：速度計の設置位置。 SP1～SP5：鋼製横矢板（スパン）の位置。
1C：1 段目の中央位置。 1,2,4kg：鉄球の質量

図 4.8 鉄球質量（衝撃エネルギー）の違いによる速度スペクトルの比較

・ いずれも 200Hz～600Hz の範囲において、大きな振動エネルギーであることが判明した。
・ 鉄球の質量に関わらず、何れの波形スペクトルもほぼ同一であると評価できる。
・ 卓越周波数は 190Hz 前後、400Hz 前後と 550～600Hz 前後であるが、SP1（スパン 1）で衝撃した場合は比較的低周波成分が卓越し、SP5（スパン 5）の場合は比較的高周波成分が卓越する傾向を示している。 スパン 5 側の 2 本の支柱基礎が岩盤上に設置されている一方，それ以外の支柱基礎は締め固めた土砂上に設置されているため、基礎地盤の違いが周波数特性に反映した可能性がある。

（iii）鋼製横矢板の衝撃高さによる変化

図 4.9 は、鉄球の質量を 2kg とし、衝撃した高さを「1 段目」～「3 段目」に変化させて速度スペクトルを比較した結果である。



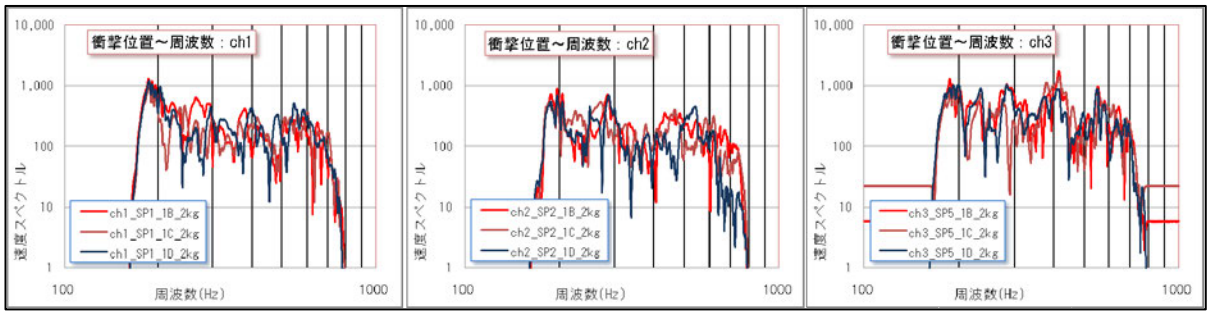
ch1～ch3：速度計の設置位置。 SP1～SP5：鋼製横矢板（スパン）の位置。
1C：1 段目の中央位置。 2C（3C）：2（3）段目の中央位置。 2kg：鉄球の質量（全て同じ）

図 4.9　鋼製横矢板の衝撃高さの違いによる速度スペクトルの比較

- 検知センサーを設置した場所によって多少の変動が見られるが、衝撃高さの違いに係わらず、卓越周波数は 190～200Hz、400Hz 前後と 550Hz 前後である。

（iv）鋼製横矢板内の水平方向の衝撃位置による変化

図 4.10 は、鉄球の質量を 2kg とし、鋼製横矢板の衝撃位置を「1B（斜面側に向かって左端）」、「1C（同じく中央）」及び「1D（同じく右端）」に変化させて速度スペクトルを比較した結果である。



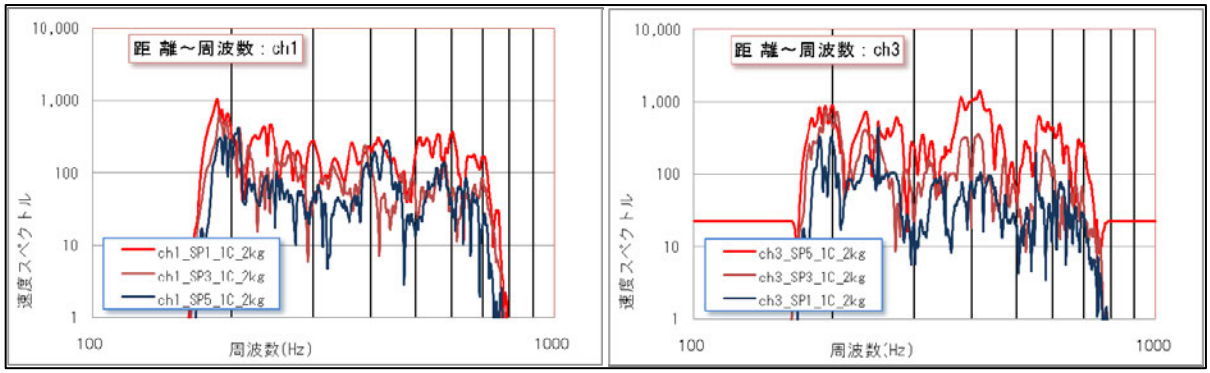
ch1～ch3：速度計の設置位置。 SP1～SP5：鋼製横矢板（スパン）の位置。
1B、1C、1D：1 段目の斜面側に向かって左端、同中央、同右端。 2kg：鉄球の質量（同一）

図 4.10　鋼製横矢板内の水平方向の衝撃位置の違いによる速度スペクトルの比較

- 検知センサーを設置した場所によって多少の変動が見られるが、衝撃位置の違いに係わらず、卓越周波数は 190～200Hz、400Hz 前後と 550Hz 前後である。

（ｖ）衝撃を加えた鋼製横矢板の位置（距離）による変化

図 4.11 は、鉄球の質量を 2kg とし、衝撃を加えた鋼製横矢板を「SP1」、「SP3」及び「SP5」に変化させて「ch1」と「ch3」で観測した速度スペクトルを比較した結果である。



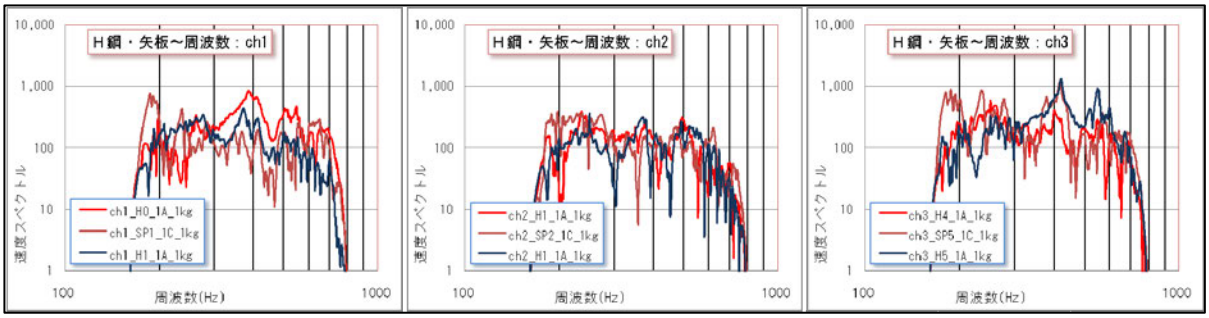
ch1，ch3：速度計の設置位置。 SP1～SP5：鋼製横矢板（スパン）の位置。
1C：1 段目の中央位置。 2kg：鉄球の質量（全て同じ）

図 4.11　衝撃を加えた鋼製横矢板の位置（距離）の違いによる速度スペクトルの比較

- スパンが離れるにつれて高周波の成分波のエネルギーが減少する傾向にあるが，ピークを示している周波数（190Hz、400Hz と 550Hz）にそれ程大きな違いは見られない。

（ⅵ）防護柵の部位（鋼製横矢板と H 形鋼）による変化＞

図 4.12 は、鉄球の質量を 1kg として衝撃を加えた場合，鋼製横矢板と H 形鋼の違いに着目して速度スペクトルを比較した結果である。



ch1～ch2：速度計の設置位置。 SP1～SP5：鋼製横矢板（スパン）の位置。
H0～H5：H 形鋼の位置。 1A：1 段目。 1C：1 段目の中央位置。 2kg：鉄球の質量（全て同じ）

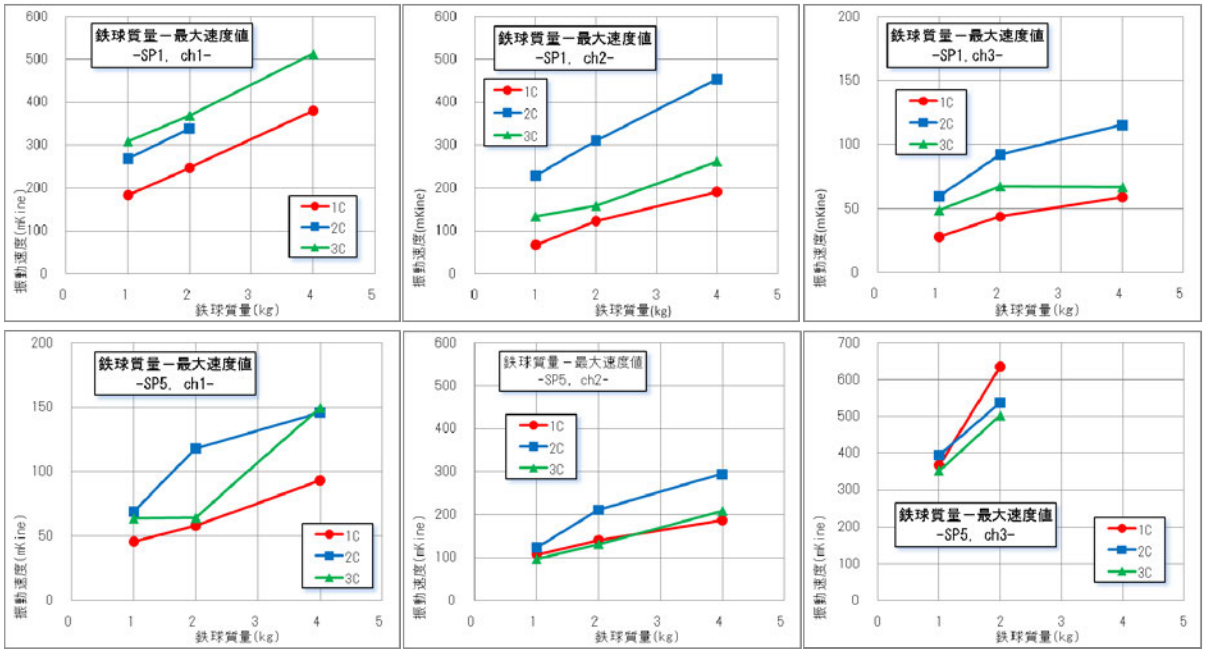
図 4.12　衝撃を加えた防護柵の部位の違いによる速度スペクトルの比較

- H 形鋼に衝撃を加えた場合，190Hz の卓越周波数が相対的に低下し，350Hz～400Hz の卓越周波数が相対的に増加する傾向が見られる。
- いずれの波形共 350Hz～400Hz の振幅はほぼ同じレベルであり，落石による衝撃振動の検知能力には大きな違いはないと言える。

③ 振幅特性

（ｉ）鉄球質量、衝撃高さと速度振幅の関係

図 4.13 は、鉄球質量、衝撃高さと速度振幅の関係をまとめたものである。



ch1～ch3：速度計の設置位置。 SP1、SP5：鋼製横矢板（スパン）の位置。
1C：1 段目の中央位置。 2C（3C）：2（3）段目の中央位置。

図 4.13　鉄球質量と最大振幅の関係

- 一部の例外があるが、衝撃高さが「2 段目」の振幅が最も大きい傾向がみられる。
- 「SP1、ch1、2C」の質量 4kg の衝撃振動と、「SP5、ch3」の質量 4kg の衝撃振動の大きさ（振幅）は、検知システムの入力限界レベル（設定値）を超えていたため、不採用とした。
- 衝撃点が「1-C」の場合は、「鉄球質量ー速度振幅」の関係式の傾斜は、比較的緩やかである。これは、前年度に実験した木製横矢板（藤岡市）と鋼製横矢板（相模原市）の結果に共通な傾向である。

（ⅱ）落石の衝突エネルギーを推定するための試み

図 4.14 は、SP4 で衝撃した時の「鉄球質量－速度振幅（平均値）」の関係をまとめたものである。
(推定の可能性を評価するための試みであるために、横矢板の中心位置である SP4 のみで実施)

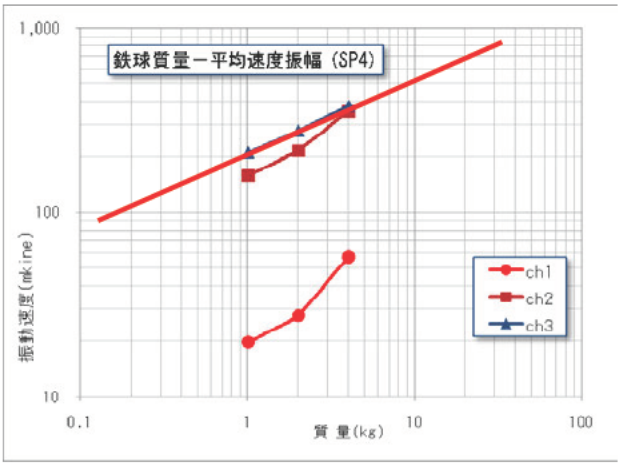
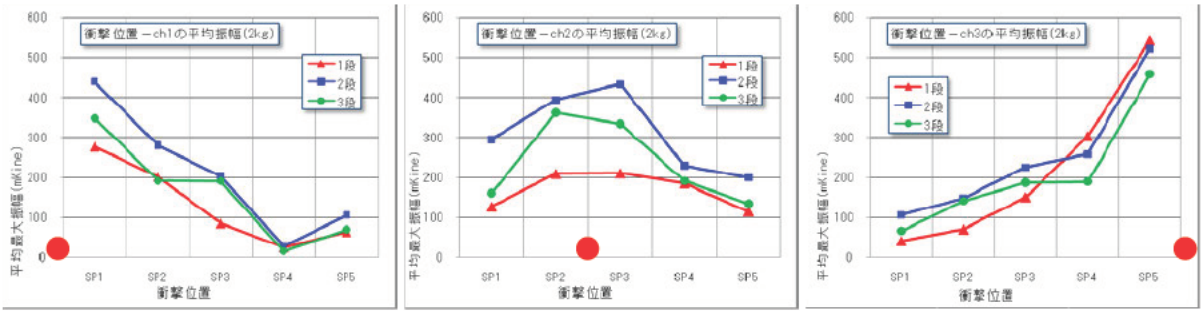


図 4.14　SP4 における鉄球質量と最大振幅（平均値）の関係

- 質量 1kg の振幅値は、衝撃高さ「1C」、「2C」と「3C」の単純平均値であり、2kg と 4kg も同様である。
- ch3 での結果が最も直線的であるため、長期検証実験で「SP4」に衝突した落石の振動に適用して検証することにした。

（ⅲ）衝撃を加えた鋼製横矢板の位置（距離減衰）による変化

図 4.15 は、質量 2kg の鉄球の衝撃位置（スパン）と最大速度振幅（平均値）の関係である。



赤丸：センサーの位置。
平均最大振幅の値は同一スパンの鋼製横矢板内の B（斜面側に向かって左端部）、C（同中央部）と D（同右端部）各箇所での衝撃の測定結果の平均値を採用

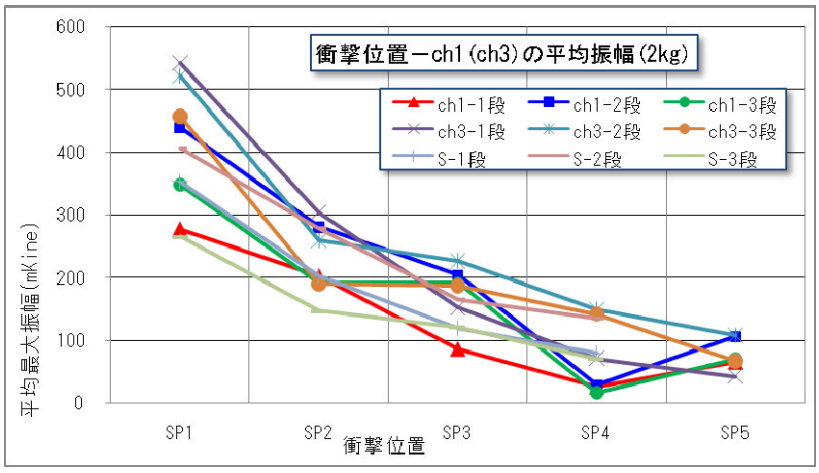
図 4.15　鉄球の衝撃位置（スパン）と最大振幅（平均値）の関係

- 鉄球の衝撃を「SP1」から「SP5」で実施した時の最大振幅の平均値である。
- 前述したように、衝撃高さ「2 段目」の振幅が最も大きい。

- 衝撃高さにかかわらず、距離（スパン）による減衰傾向は，ほぼ同じであると見なせる。
- 衝撃の振幅は、「SP1」よりも「SP5」の方が相対的に大きい。
- 一方、「SP4」で発生した振動が「ch2」と「ch1」方向に伝搬する場合、相対的に小さくなる傾向が見られる。
- 同一材料で施工された鋼製横矢板でも、衝撃によって発生する振動の大きさが場所（位置）によって変化する可能性があること、伝搬する方向によって減衰特性が異なる可能性があることを意味しており、落石センサーを設置する間隔の決定に当たっては、十分留意する必要があることを示唆している。

（iv）相模原の仮設防護柵との比較

図 4.16 は、前年度の基礎実験で対象とした相模原市内の仮設防護柵（鋼製横矢板）と、今回実施した足尾仮設防護柵の各減衰特性を比較した結果である。



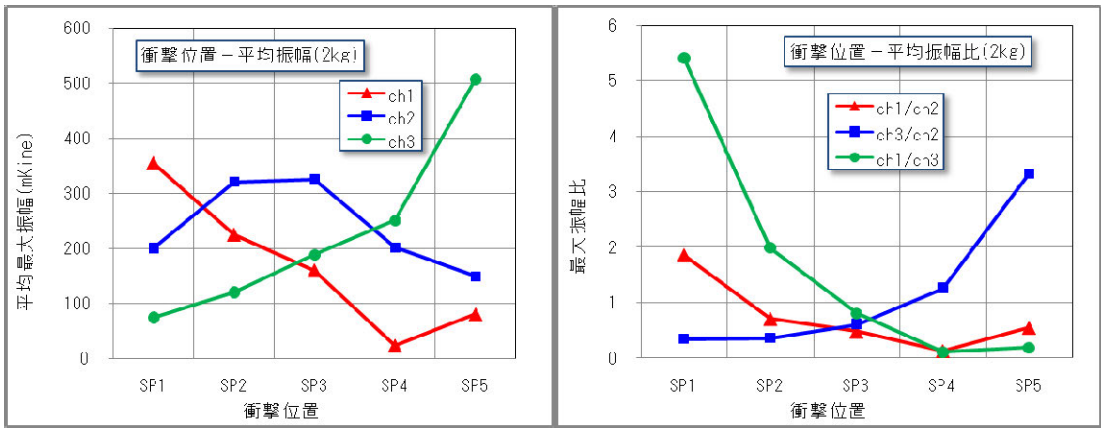
S-1 段～S-3 段：相模原の結果。 ch1-1（ch3-1）段～ch1-3（ch3-3）段：足尾の結果
いずれも鉄球は 2kg。 グラフ作成上、足尾の ch3 では SP1～SP5 の関係は逆とした

図 4.16　相模原仮設防護柵と足尾仮設防護柵の減衰特性の比較

- 足尾の「ch1 の SP4」を除けば、相模原に設置された鋼製横矢板と足尾の鋼製横矢板の減衰特性に大きな違いがないことが確認された。

（ｖ）落石の衝突位置を推定するための試み

図 4.17 は、質量 2kg の鉄球の衝撃位置（スパン）と最大速度振幅（平均値）及び、その振幅比の関係である。



平均最大振幅の値は同一スパンの鋼製横矢板内の B（斜面側に向かって左端部）、C（同中央部）と D（同右端部）各箇所での衝撃の測定結果の平均値を採用

図 4.17　鉄球の衝撃位置（スパン）と最大振幅（平均値）の関係

- 図 4.17（左）は、2kg による衝撃振動を各センサーで検出した最大振幅値の平均値を使用して求めた「平均最大振幅比」である。SP4 で発生する振動の振幅が相対的に小さい傾向にあることが確認された。これは図 4.15 と同様の傾向である。
- 図 4.17（右）は、平均振幅を利用して「ch1/ch2」、「ch3/ch2」及び「ch1/ch3」を計算した結果である。このような平均振幅比計算（＝正規化処理）をすることにより、落石の規模による振幅の変化に大きな影響を受けずにその衝突位置を推定できる可能性があると考えられる。

④ まとめ

事前基礎実験、並びに前年度に相模原で実施した鋼製横矢板製の仮設防護柵での実験結果から得られた知見などを以下に示す。

（ⅰ）周波数特性

- 前年度に相模原で実施した鋼製横矢板製の仮設防護柵での実験結果から、落石を検知するために使用する周波数帯を 200Hz～600Hz に設定して事前基礎実験を行ったところ、190Hz 前後、400Hz 前後及び 550～600Hz 前後の卓越周波数を確認することができた。
- 速度センサーを使用する検知システムの場合、落石を検知するための周波数は「200Hz～600Hz」が妥当であると考えられる。

（ⅱ）振幅特性

- 相模原市内での結果を総合すると、幅 2m の鋼製横矢板では、3 スパン（6m）ないし 4 スパン（8m）程度までの落石振動を検知できることが判明した。
- 比較的大きな振動の場合（落石の質量が大きい場合）は、最大振幅値から落石の衝突エネルギーを推定できる可能性がある。
- 比較的大きな振動の場合（落石の質量が大きい場合）は、複数の検知センサーで同時に観測された振動波形の最大振幅値の比から、落石の衝突した位置（鋼製横矢板：スパン）を推定できる可能性がある。

(2) 加速度型振動計による実験結果

① 周波数特性

周波数特性に関しては、以下に着目した加速度応答スペクトルの比較を行った。

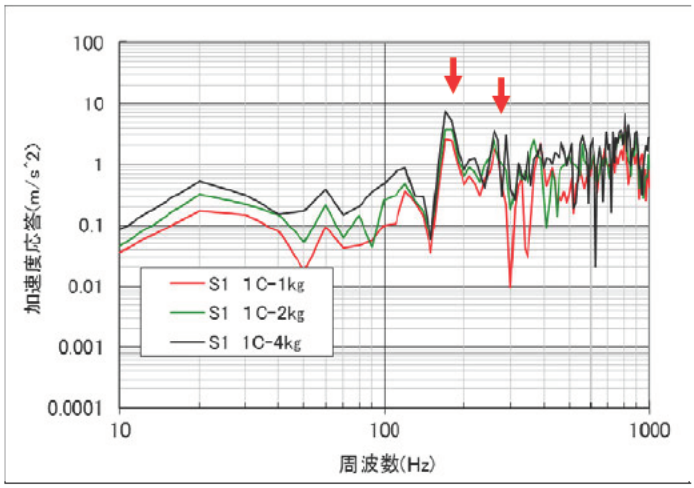
- 鉄球質量（衝撃エネルギー）の違い
- 鋼製横矢板の衝撃高さの違い
- 鋼製横矢板内の水平方向の衝撃位置の違い
- 衝撃を加えるスパン位置の違い
- 衝撃を加える防護柵の部位（鋼製横矢板と H 形鋼）の違い
- 衝撃を加える鋼製横矢板の部位（凹凸）の違い
- 既往の仮設防護柵（相模原）での実験結果との比較

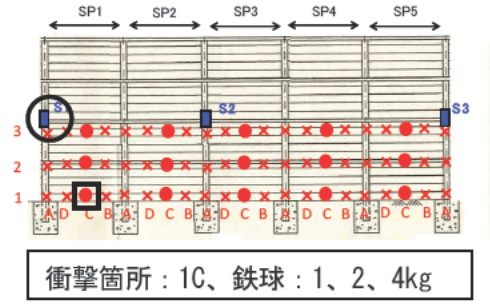
以下に代表的な測定結果を踏まえ、各比較結果について報告する。

(ⅰ)鉄球質量（衝撃エネルギー）の違いによる比較

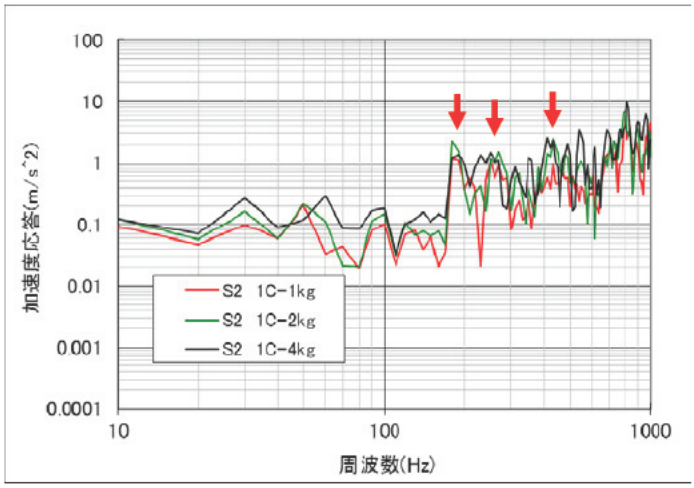
図 4.18 は、鉄球質量（衝撃エネルギー）の違い（1、2 および 4kg）に着目した加速度応答スペクトルの比較結果である。防護柵を川側から見て左端のスパン 1（上段図)、防護柵内部のスパン 2（中段図)、防護柵を川側から見て右端のスパン 5（下段図）に着目し、鉄球質量の違いによる周波数特性について調べた。図より下記知見が得られた。

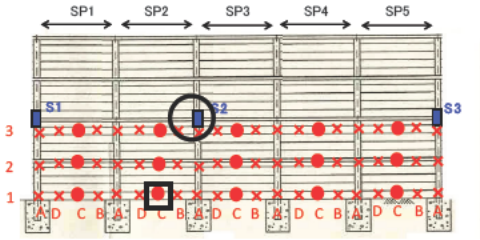
- 鉄球質量に関わらず、ほぼ 180Hz よりも高い周波数帯域で加速度応答レベルが大きくなっており、同じ周波数付近（180Hz、270Hz、400Hz）に卓越周波数を示すピークが認められる。
- この傾向は、上段図、中段図および下段図でも類似している。



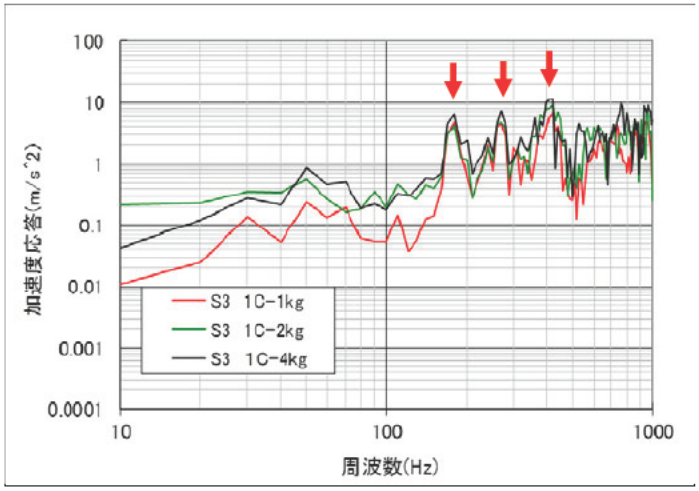


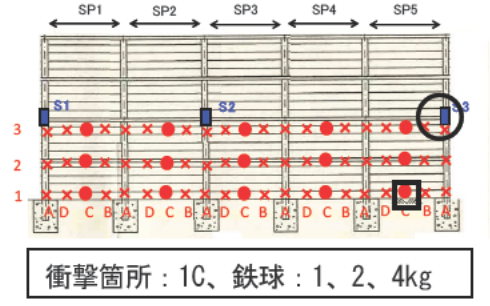
衝撃箇所：1C、鉄球：1、2、4kg





衝撃箇所：1C、鉄球：1、2、4kg





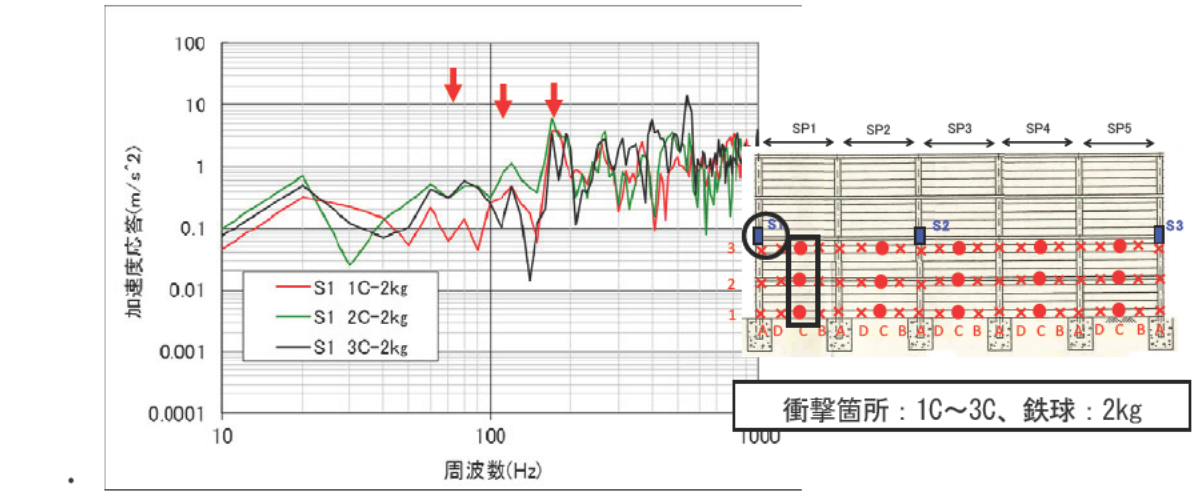
衝撃箇所：1C、鉄球：1、2、4kg

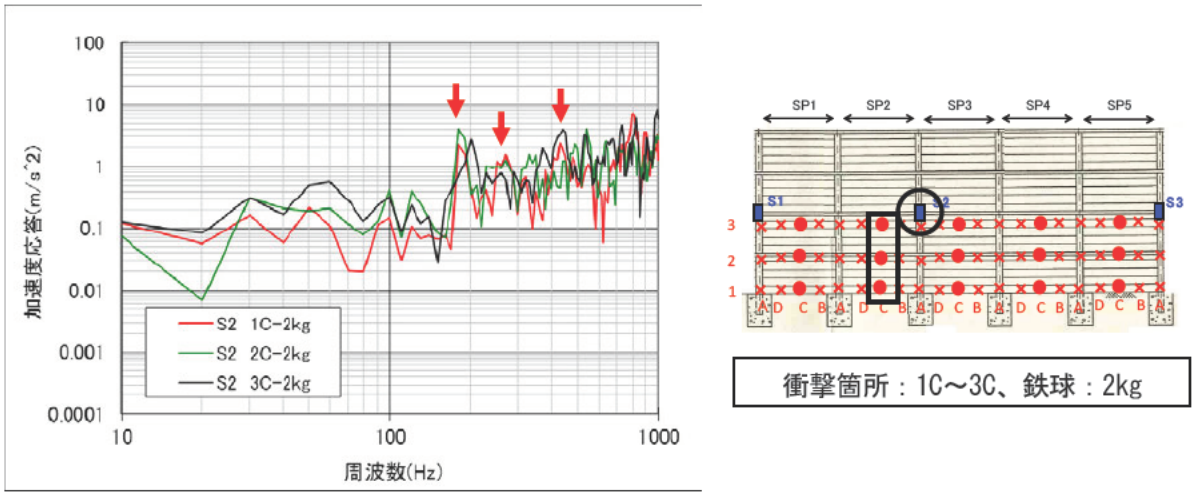
図 4.18　鉄球質量（衝撃エネルギー）の違いに着目した加速度応答スペクトルの比較

（ⅱ）鋼製横矢板の衝撃高さの違いによる比較

図 4.19 は、鋼製横矢板の衝撃高さの違い（横矢板 1 段目、3 段目、5 段目）に着目した加速度応答スペクトルの比較結果である。防護柵を川側から見て左端のスパン 1（上段図）、防護柵内部のスパン 2（中段図）、右端のスパン 5（下段図）に着目し、衝撃高さの違いによる周波数特性について調べた。図より下記知見が得られた。

- 衝撃の高さに関わらず、ほぼ 180Hz よりも高い周波数帯域で加速度応答レベルが高くなっており、同じ周波数付近（180Hz、270Hz、400Hz）に卓越周波数を示すピークが認められる。
- この傾向は、上段図、中段図および下段図でも類似している。





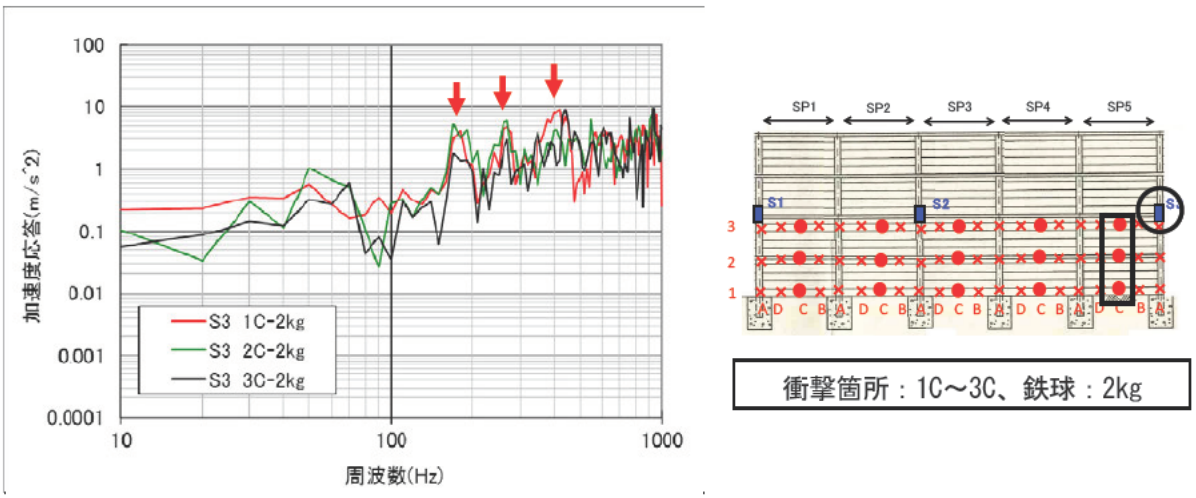
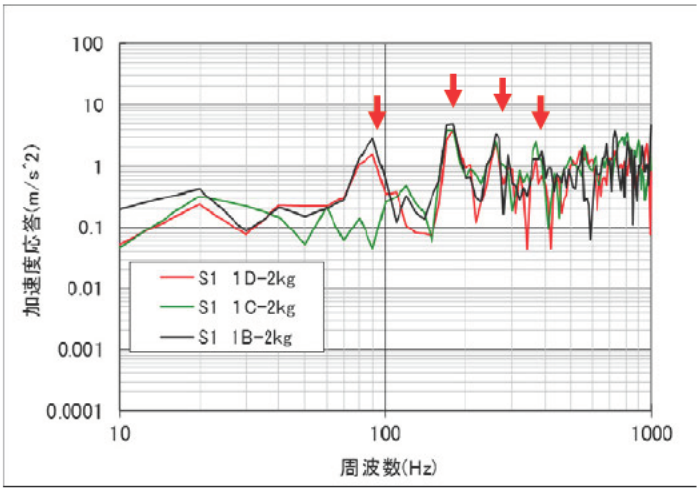


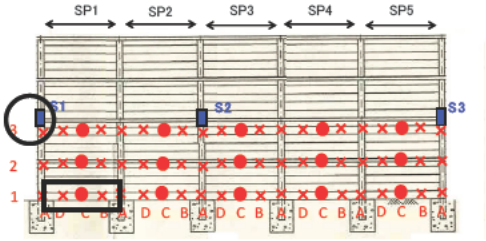
図 4.19　鋼製横矢板の衝撃高さの違いに着目した加速度応答スペクトルの比較

（iii）鋼製横矢板内の水平方向の衝撃位置の違い

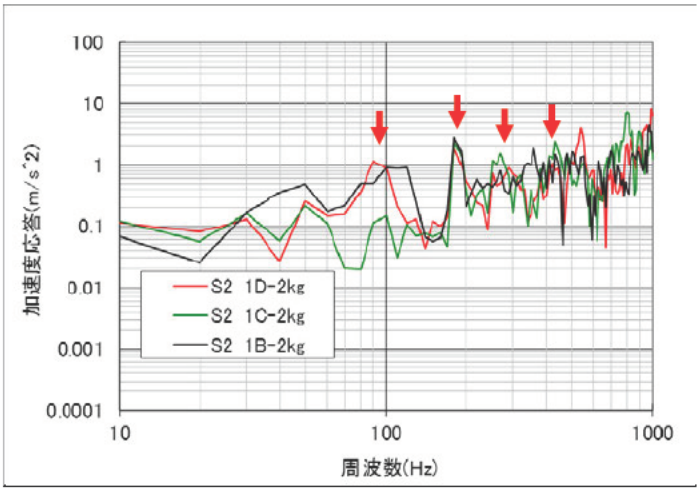
図 4.20 は、鋼製横矢板内の水平方向の衝撃位置の違い（川側から斜面側を見て左端、中央、右端）に着目した加速度応答スペクトルの比較結果である。防護柵川側から斜面側を見て左端のスパン 1（上段図）、防護柵内部のスパン 2（中段図）、防護柵川側から斜面側を見て右端のスパン 5（下段図）に着目し、横矢板内水平方向の衝撃位置の違いによる周波数特性について調べた。図より下記知見が得られた。

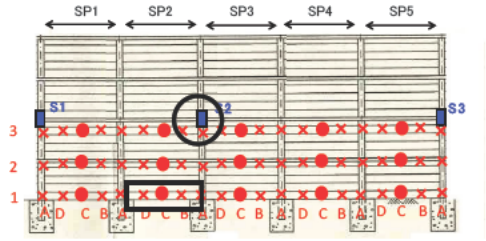
- 水平方向の衝撃位置に関わらず、ほぼ 180Hz よりも高い周波数帯域で加速度応答レベルが高くなっており、同じ周波数付近（180Hz、270Hz、400Hz）に卓越周波数を示すピークが認められる。
- この傾向は、上段図、中段図および下段図でも類似していることから、測定位置やスパン位置に関わらず、防護柵全体で同じ周波数特性を示していることが推察される。
- 一方、スパン 1 およびスパン 2 のみに、90Hz 付近で卓越周波数を示すピークが認められる。この傾向は、H 形鋼の取り付け部に近い両端（B、D）の衝撃時のみに見られる傾向である。ただし、スパン 5 には認められない。スパン 1 およびスパン 2 のみに低い周波数領域でピークが出現した理由は、スパン 5 側の 2 つの支柱基礎が岩盤上にある一方で、それ以外の支柱基礎が締め固めた土砂上に設けられ、このように基礎地盤の違いを反映したものと考えられる。



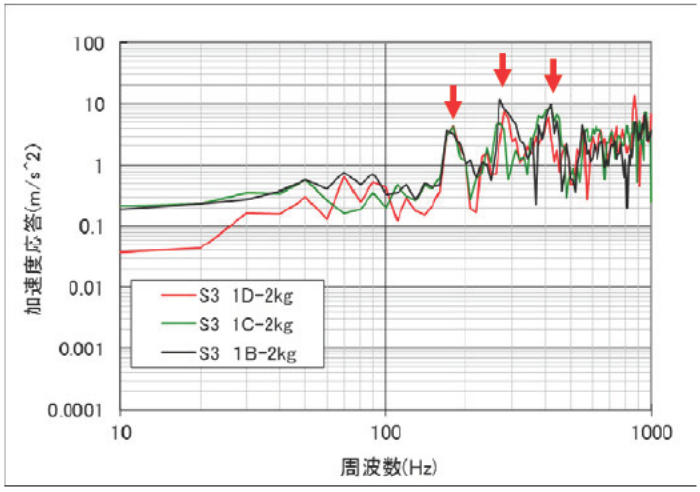


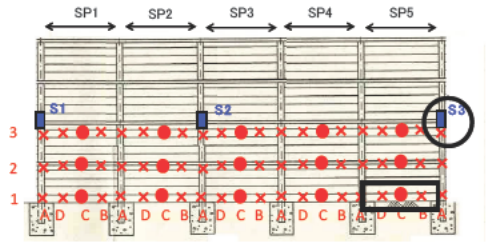
衝撃箇所：1B、1C、1D、鉄球：2kg





衝撃箇所：1B、1C、1D、鉄球：2kg





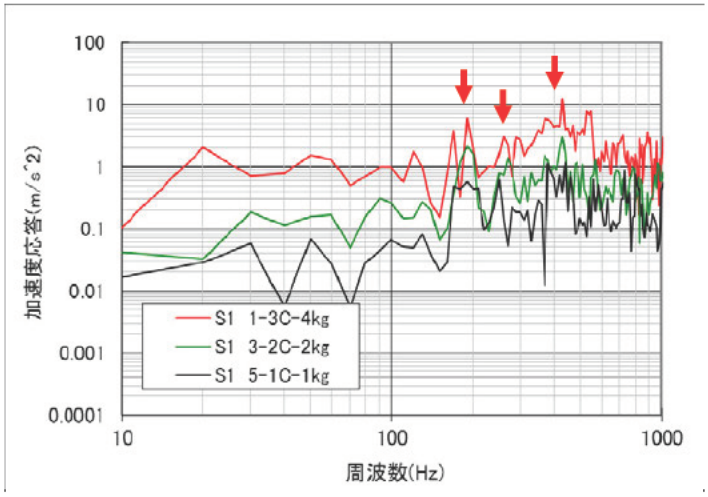
衝撃箇所：1B、1C、1D、鉄球：2kg

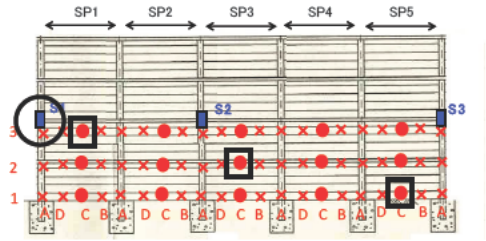
図 4.20　鋼製横矢板内の水平方向の衝撃位置の違いに着目した加速度応答スペクトルの比較

＜衝撃を加えるスパン位置の違い＞

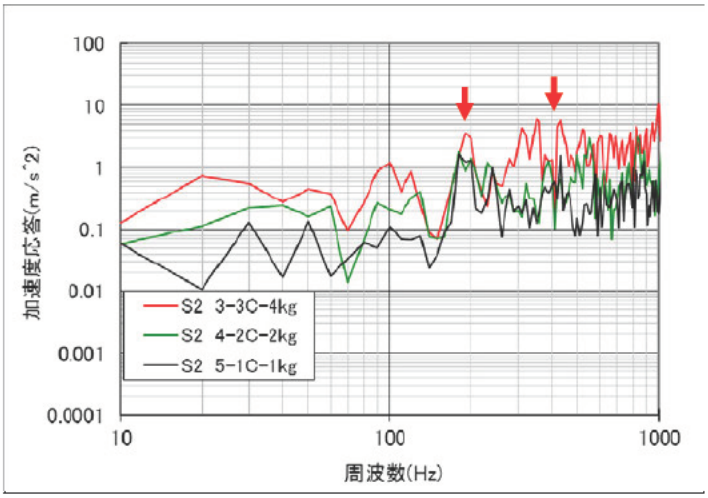
図 4.21 は、衝撃を加えるスパン位置の違いに着目した加速度応答スペクトルの比較結果である。防護柵川側から斜面側を見て左端の支柱に設置した加速度計（上段図）、防護柵内部のスパン 2～3 に設置した加速度型振動計（中段図）、防護柵川側から斜面側を見て右端の支柱に設置した加速度計（下段図）に着目し、衝撃を加えるスパン位置の違い（加速度計に対して最も遠い位置～中間位置～最も近い位置）による周波数特性について調べた。図より下記知見が得られた。

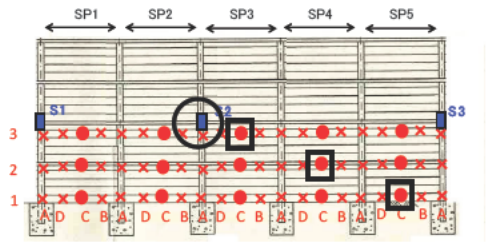
- 衝撃を加えるスパン位置に関わらず、ほぼ 180 Hz よりも高い周波数帯域で加速度応答レベルが高くなっており、バラツキがあるもののほぼ同じ周波数（180Hz、270Hz、400Hz）で卓越周波数を示すピークが認められる。
- この傾向は、上段図、中段図および下段図でも類似している。



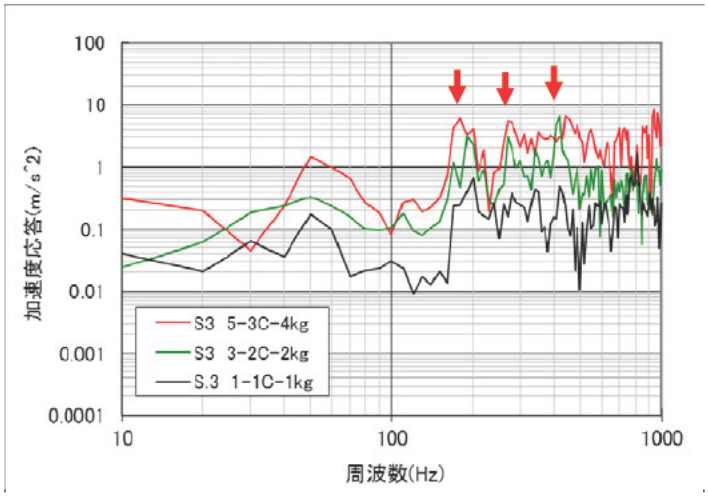


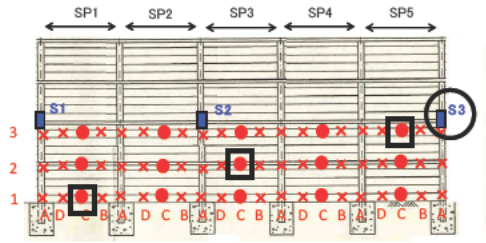
衝撃箇所、鉄球：
1-3C-4kg、3-2C-2kg、5-1C-1kg





衝撃箇所、鉄球：
3-3C-4kg、4-2C-2kg、5-1C-1kg





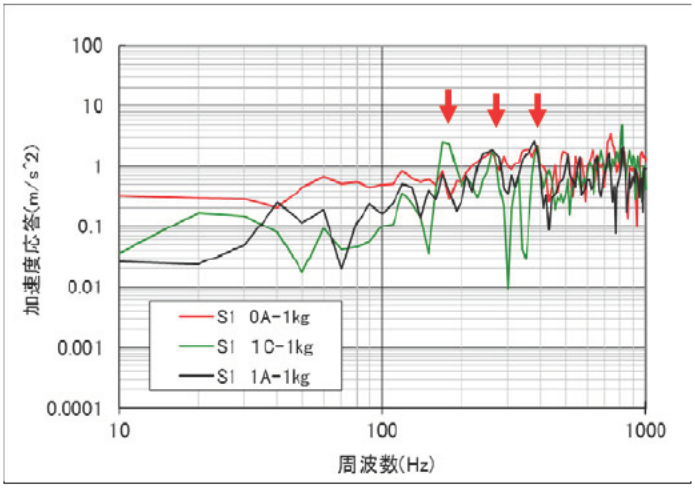
衝撃箇所、鉄球：
1-1C-1kg、3-2C-2kg、5-3C-4kg

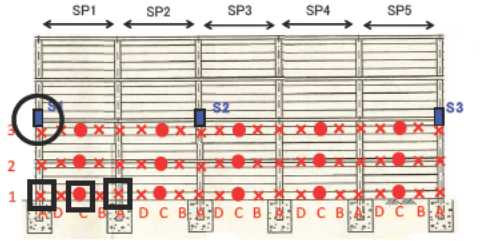
図 4.21　衝撃を加えるスパン位置の違いに着目した加速度応答スペクトルの比較

（ｖ）衝撃を加える防護柵の部位（鋼製横矢板とＨ形鋼）の違い

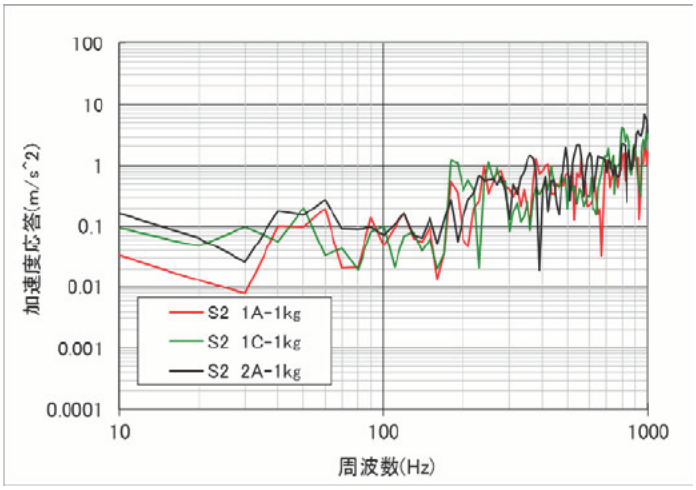
図 4.22 は、衝撃を加える防護柵の部位（鋼製横矢板と H 形鋼）の違いに着目した加速度応答スペクトルの比較結果である。防護柵を川側から見て左端のスパン 1（上段図）、防護柵内部のスパン 2（中段図）、防護柵川側から斜面側を見て右端のスパン 5（下段図）に着目し、衝撃を加える防護柵の部位の違いによる周波数特性について調べた。図より下記知見が得られた。

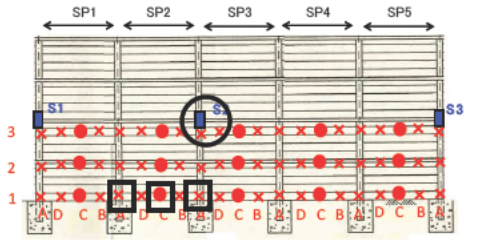
- 衝撃を加える防護柵の部位に関わらず、ほぼ 180Hz よりも高い周波数帯域で加速度応答レベルが高くなっており、同じ周波数付近（180Hz、270Hz、400Hz）に卓越周波数を示すピークが認められる。
- この傾向は、上段図、中段図および下段図でも類似していることから、測定位置やスパン位置に関わらず、防護柵全体で同じ周波数特性を示していることが推察される。
- ただし、180Hz のピークは、H 形鋼に衝撃を加えた場合が鋼製横矢板の場合に比べてあまり明瞭でない。



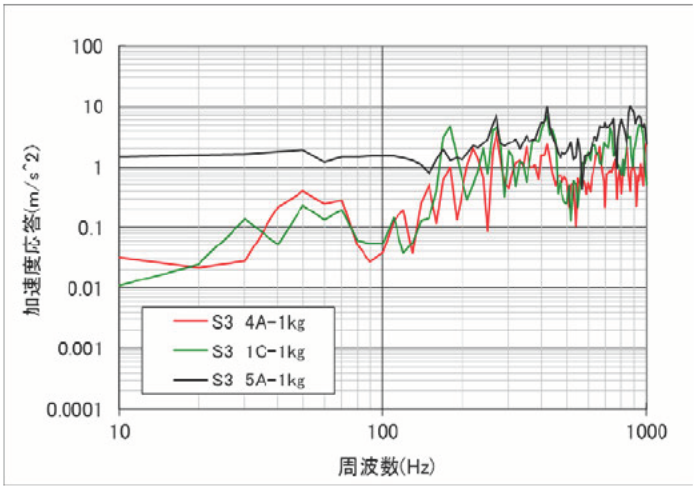


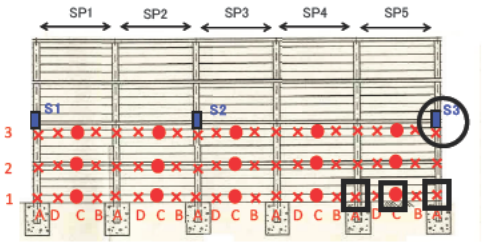
衝撃箇所：0-1A、1-1C、1-1A、鉄球：1kg





衝撃箇所：1-1A、2-1C、2-1A、鉄球：1kg





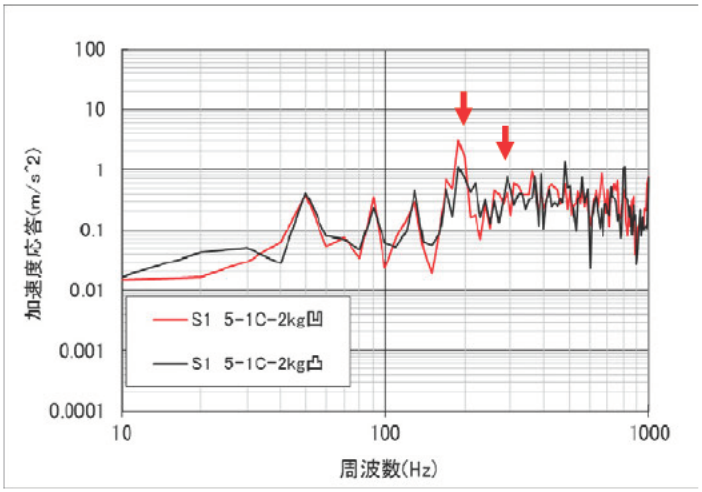
衝撃箇所：4-1A、5-1C、5-1A、鉄球：1kg

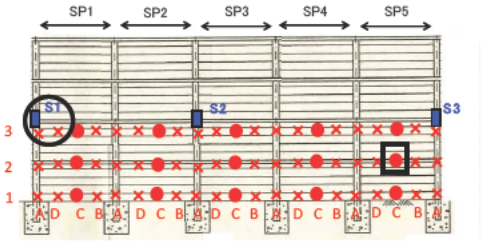
図 4.22　衝撃を加える防護柵の部位の違いに着目した加速度応答スペクトルの比較

（vi）衝撃を加える横矢板の部位（凹凸）の違い

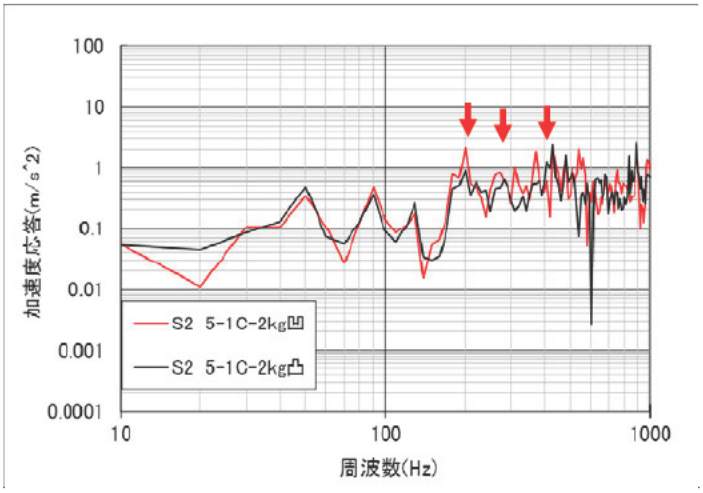
図 4.23 は、衝撃を加える横矢板の部位（凹凸）の違いに着目した加速度応答スペクトルの比較結果である。スパン 5 の 3 段目中央（5-2C）の横矢板の凹部と凸部に衝撃を加え、防護柵を川側から見て左端支柱の加速度型振動計（上段図）、防護柵内部のスパン 2～3 間の支柱の加速度型振動計（中段図）、および防護柵を川側から見て右端支柱の加速度型振動計（下段図）で測定した場合の周波数特性について調べた。図より下記知見が得られた。

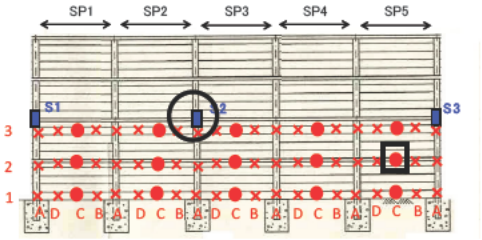
- 衝撃を加える横矢板の部位（凹凸）の違いに関わらず、ほぼ 180 Hz よりも高い周波数帯域で加速度応答レベルが高くなっており、バラツキがあるものの同じ周波数付近（180Hz、270Hz、400Hz）の卓越周波数を示すピークが認められる。
- この傾向は、上段図、中段図および下段図でも類似している。



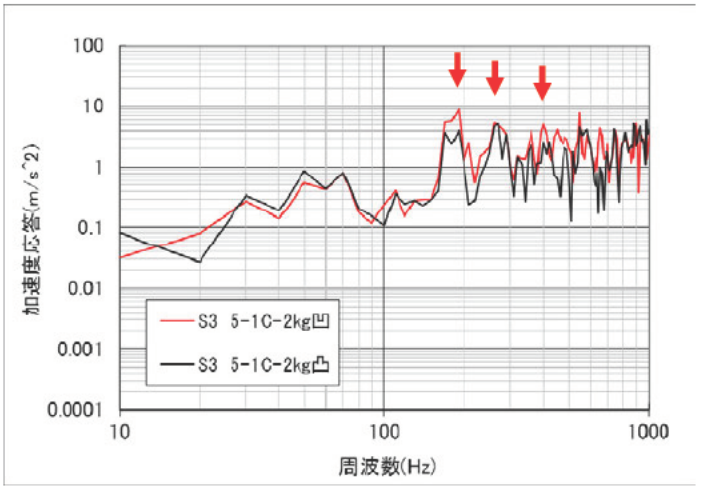


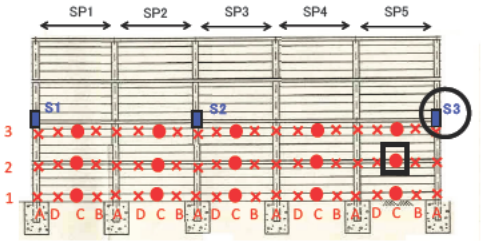
衝撃箇所：5-2C、鉄球：2kg





衝撃箇所：5-2C、鉄球：2kg





衝撃箇所：5-2C、鉄球：2kg

図 4.23　衝撃を加える横矢板の部位（凹凸）の違いに着目した加速度応答スペクトルの比較

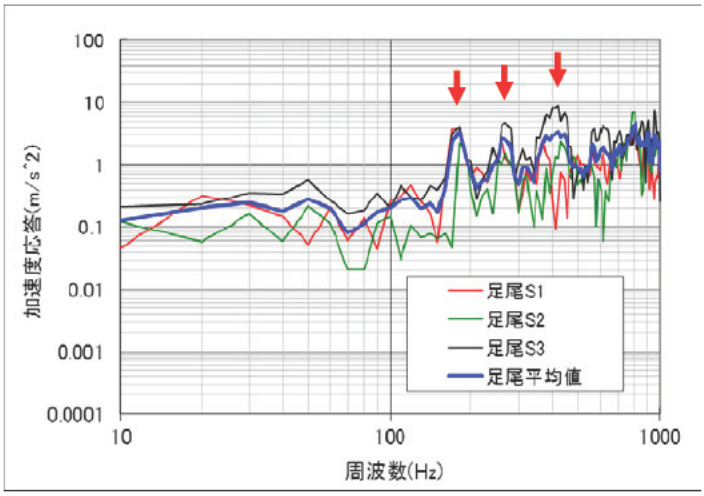
(vii) 既往の仮設防護柵（相模原）での実験結果との比較

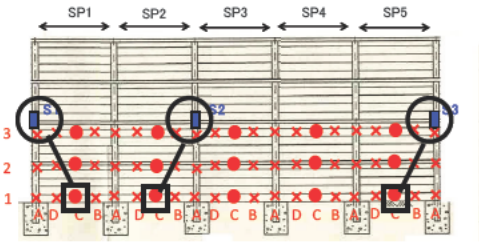
平成 21 年度に実施した相模原における現地基礎実験で対象とした鋼製横矢板の仮設防護柵と今回の足尾での長期検証実験で設置した仮設防護柵の諸元を表 4.2 に示す。材質・構造はほぼ同じであるが、高さ、スパン数が異なっている。また、支柱の根入れ長や基礎地盤については、相模原の仮設防護柵は不明である。この同じ材質・構造の足尾と相模原の仮設防護柵の代表的な加速度応答スペクトルの比較を図 4.24 に示した。図には、足尾および相模原ともに衝撃箇所と測定箇所がほぼ同じ場合のスペクトルを示している。上段図では足尾の 3 箇所についてのスペクトルとその平均スペクトルを示し、下段図では上段図と同じ足尾の平均スペクトルと相模原のスペクトルをそれぞれ示した。図より下記知見が得られた。

- 下段図を見ると、足尾と相模原ともに 180～200Hz 以上から加速度応答レベルが高くなっている。
- ピーク周波数は、足尾と相模原で若干ずれがあるものの、どちらも 180～200Hz、270～300Hz、400～450Hz に卓越周波数を示すピークが見られる。

表 4.2　実験対象とし鋼製横矢板の仮設防護柵の諸元比較

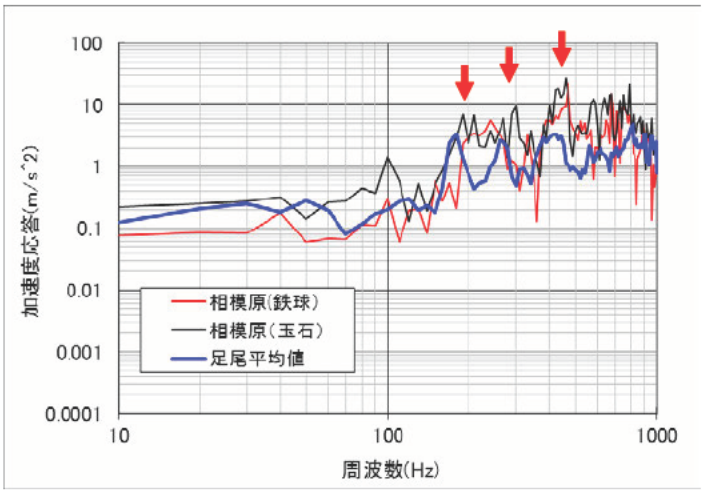
設置箇所	足尾長期実証実験	相模原基礎実験
写真		
高さ	4m	5m
支柱根入れ長	1m	不明
スパン幅/スパン数	2m／5スパン	2m／7スパン
支柱(H鋼材)	H-150	H-250
横矢板種類	軽量鋼矢板(Ⅰ型)	軽量鋼矢板(Ⅰ型)
備考	・根固めコンクリート(□600×600×深さ1000mm ・鋼矢板は溶接固定 ・基礎地盤は土砂および岩盤	・支柱根元はコンクリート根固め ・鋼矢板は溶接固定 ・基礎地盤は不明

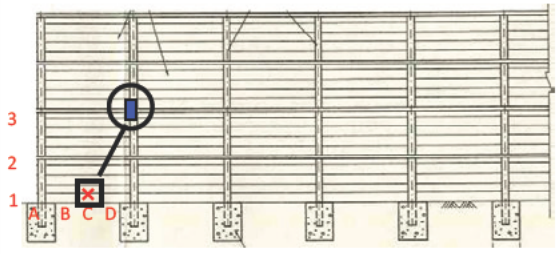




衝撃箇所：1C、鉄球：2kg

＜足　尾＞





衝撃箇所：1C、鉄球：2kg

＜相模原＞

図 4.24　鋼製横矢板の仮設防護柵の加速度応答スペクトルの比較（足尾と相模原）

② 振幅特性

振幅特性に関しては、各測定スパン位置と衝撃スパン位置に対する加速度最大振幅の違いに着目し、次の比較を行った。

- 鉄球質量（衝撃エネルギー）、衝撃高さの違い
- 既往の仮設防護柵（相模原）での実験結果との比較

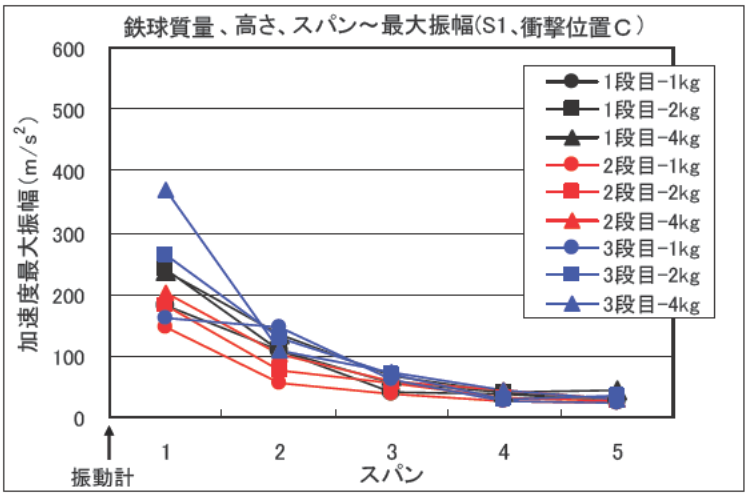
以下に代表的な測定結果を踏まえ、各比較結果について報告する。

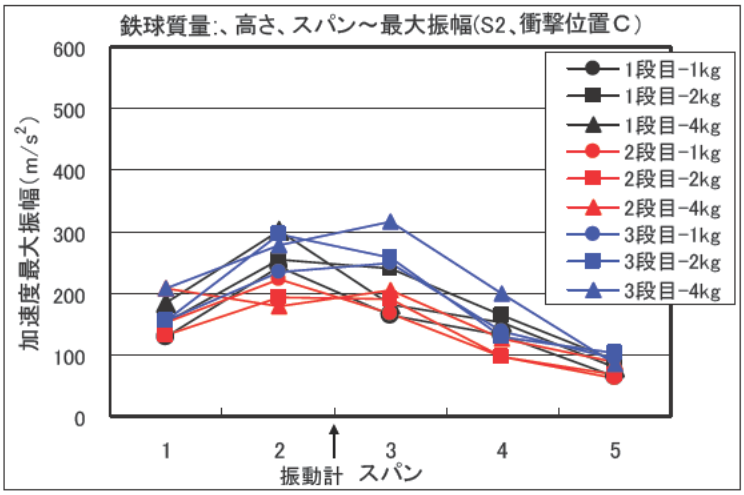
（ｉ）鉄球質量（衝撃エネルギー）、衝撃高さの違い

図 4.25 は、鉄球質量と衝撃スパン位置の違いによる加速度最大振幅を衝撃高さ毎に整理したものである。各鉄球質量、衝撃高さいずれにおいても最大振幅の距離減衰が認められ、図より下記知見が得られた。

- 振動測定高さ（2m）から衝撃位置が離れるほど、また鉄球質量が小さくなるほど、最大振幅の値が小さくなる傾向が概ね見られた。しかし、位置や質量が違っても振幅値がほぼ同じである結果や一部値が逆転している結果もあった。これは、鉄球の鋼矢板への当たり方の微妙なずれや、鋼矢板と H 形鋼との溶接処理（品質のバラツキなど）の影響が考えられる。
- 振動測定位置から 3 スパン離れると、鉄球質量や衝撃高さの違いによる最大振幅の差がほとんど無い。
- 上段図と下段図を比べると、距離減衰が振動計を左端に設置して測定した場合と右端に設置した場合と異なり、右端に設置した場合の距離減衰が大きいことが認められる。この理由は、振動測定箇所の地盤の固さ（スパン 5 側の 2 つの支柱基礎が岩盤上に設けられている一方で、それ以外の支柱基礎が締め固めた土砂上に設置されている）に起因し、地盤が固い右側がより大きい振幅が現れやすいと推察する。

一方、図 4.26 は、同一の鉄球質量で横矢板内の 3 箇所（H 形鋼に近い両端と中央）の衝撃した場合による最大振幅の平均値をスパン別にプロットしたものである。鉄球質量の違いよる傾向以外については、上述とほぼ同じ傾向が認められる。





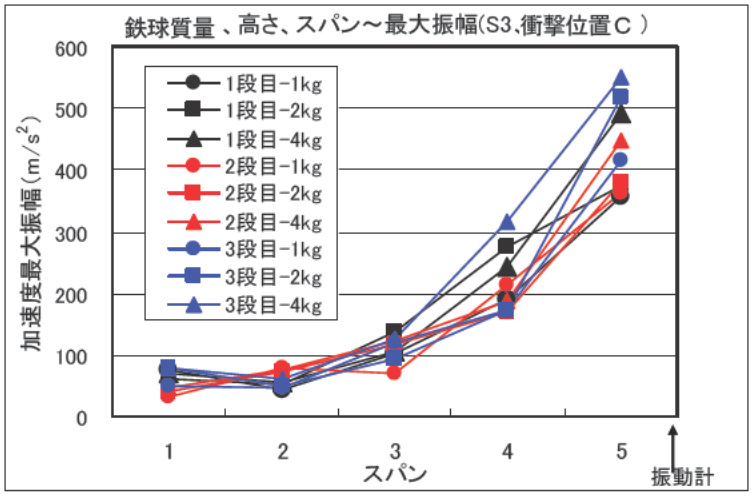
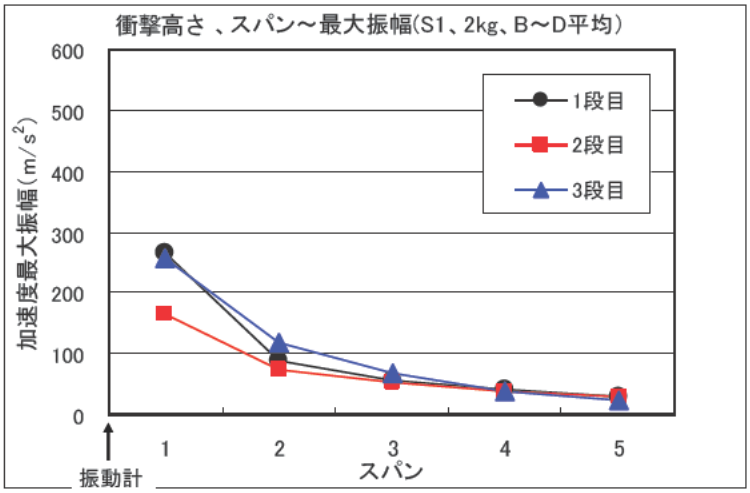
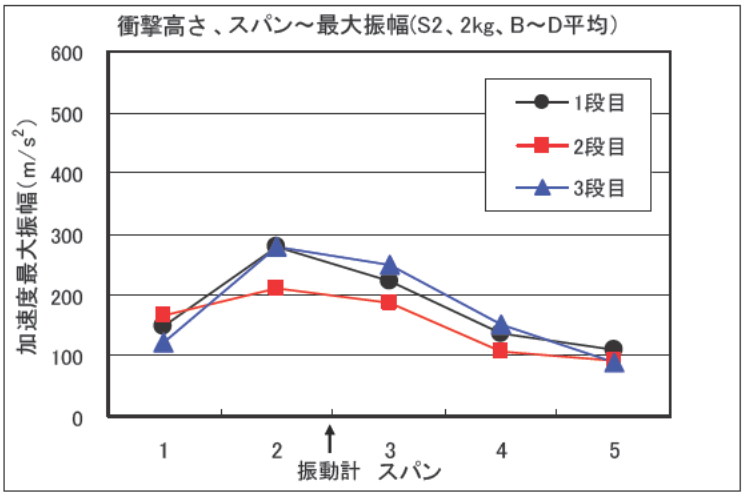


図 4.25 鉄球質量、衝撃高さ、衝撃スパン位置に着目した最大振幅の比較





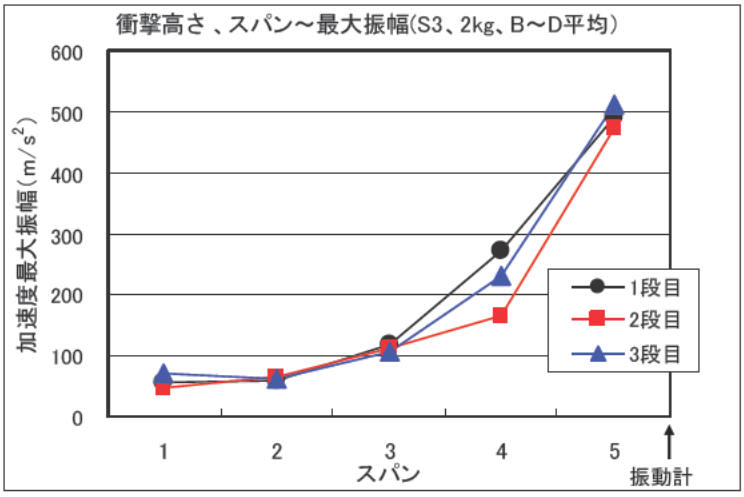
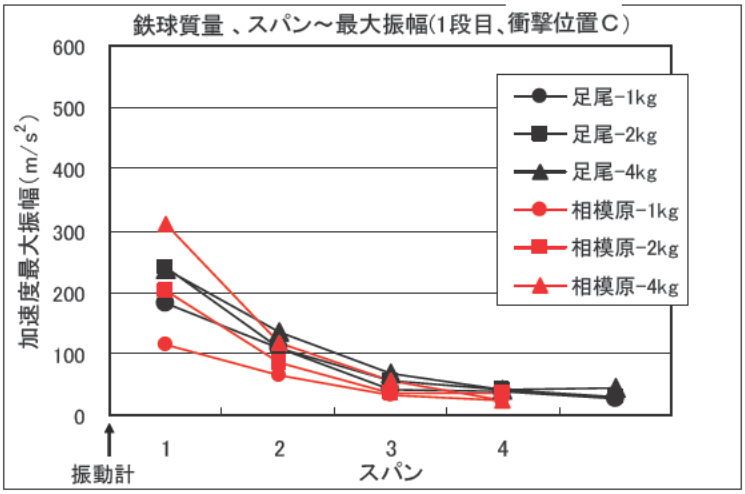


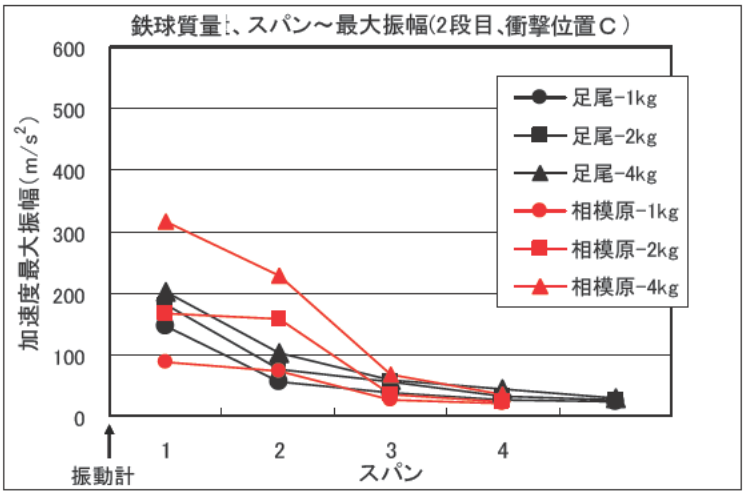
図 4.26 衝撃高さ、衝撃スパン位置に着目した最大振幅の比較（横矢板内 3 箇所平均値）

（ⅱ）既往の現地実験（相模原）での実験結果との比較

前述の表 4.2 に表示したように、同じ材質・構造の足尾と相模原の仮設防護柵について、鉄球質量、衝撃高さに着目した加速度最大振幅の比較を図 4.27 に示した。相模原の場合、スパン端部に振動計を取り付けたケースのみの測定であった。条件を同じにするため、足尾のデータは、同様に端部（振動測定位置は防護柵川側から斜面側を見て左端：S1）による測定結果を比較対象とした。図より下記知見が得られた。

- データのばらつきはあるが、足尾と相模原の最大振幅レベルや距離減衰の傾向はほぼ同じであることが認められる。ただし、スパン 1、2 で一部足尾に比べて相模原の最大振幅が大きいのは、相模原の仮設防護柵の高さが 5m と、足尾の 4m に比べて 1m 高い分振動しやすいので、若干振幅が大きく出たものと推察される。
- どちらの結果も、振動測定位置から 3 スパン離れると、鉄球質量や衝撃高さの違いによる最大振幅の差がほとんど無い。
- 上記の比較結果を踏まえると、鋼製横矢板の仮設防護柵の場合、材質・構造が同じであれば、高さやスパン数が異なっても、最大振幅の距離減衰傾向は同じであることが示唆される。





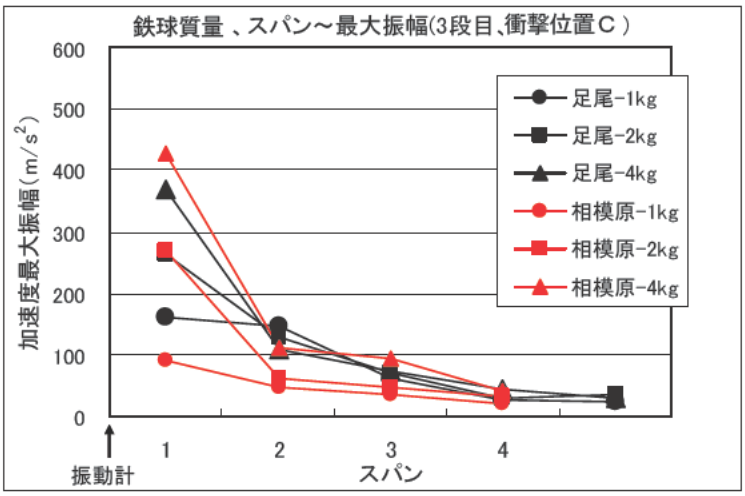


図 4.27　鋼製横矢板の最大振幅の比較（足尾と相模原）

③ まとめ

事前基礎実験結果より得られた主な知見は、以下のとおりである。

(ⅰ)周波数特性

- 衝撃エネルギーの大きさや衝撃位置、測定位置などの違いに関わらず、防護柵の衝撃時の加速度応答スペクトルは、180Hz 以上より加速度応答レベルが高くなっており、180、270 および 400Hz 付近に卓越周波数を示すピークが見られた。
- この傾向は、若干のばらつきはあるが、同じ材質、構造である相模原の鋼製横矢板の仮設防護柵の結果と同じであった。すなわち、足尾と相模原ともに 180～200Hz 以上から加速度応答レベルが高くなっている。また、卓越周波数は足尾と相模原で若干ずれがあるものの、どちらも 180～200Hz、270～300Hz、400～450Hz に卓越周波数を示すピークが見られる。
- 以上の結果を踏まえると、鋼製横矢板の仮設防護柵の場合、材質・構造が同じであれば、高さやスパン数が異なっても、周波数特性は防護柵全体で同じであることが示唆される。

(ⅱ)振幅特性

- 振動測定高さ（2m）から衝撃位置が離れるほど、また鉄球質量が小さくなるほど、最大振幅の値が小さくなる傾向が概ね見られた。しかし、位置や質量が違っても振幅値がほぼ同じである結果や一部値が逆転している結果もあった。これは鉄球の鋼矢板への当たり方の微妙なずれや、鋼矢板の H 形鋼への溶接処理のバラツキなどの影響が考えられる。
- 振動測定位置から 3 スパン離れると、鉄球質量や衝撃高さの違いによる最大振幅の差がほとんど無い。
- 上記の傾向は、材質や構造が同じ相模原の仮設防護柵でも認められた。
- 一部足尾に比べて相模原の最大振幅レベルが大きいのは、相模原の仮設防護柵が 5mと足尾の 4mに比べて 1m高い分振動しやすいので、若干振幅が大きく出たものと推察される。
- 以上の比較結果を踏まえると、鋼製横矢板の仮設防護柵の場合、材質・構造が同じであれば、高さやスパン数が異なっても、最大振幅の距離減衰傾向は同じであることが示唆される。

4.4　長期検証実験

4.4.1　実証実験期間

平成 22 年 12 月 8 日（水）～平成 23 年 4 月 22 日（金）

※　電源故障による平成 23 年 1 月 12 日～2 月 21 日は除く

4.4.2　実験計画

(1) 実験方法および内容

本実験における崩落検知システムの検証方法および内容は、データ回収を踏まえ、次のとおりとする。

- 崩落検知データを時系列に整理し、各検知データ（振動測定データ）、監視カメラの画像記録および気象データ等と照合することで、検知時の振動発生原因（落石・斜面崩壊、工事振動、地震動など）を特定する。
- 特定結果を踏まえ、検知センサーの検知精度、信頼性、改良内容について検討する。
- 代表的な落石、斜面崩壊について、振動測定データや監視カメラ画像記録から前兆現象の有無や崩壊形態・規模などについて調べるとともに、検知データとの関係性について整理する。
- 一連の整理結果において、前兆現象や崩壊形態・規模等と検知データとの相関性が確認された場合、これらの知見を検知システム構築と機能向上に活かす。

(2) 崩落検知システムおよび検証データ取得用機器について

長期検証実験では、共同研究 2 社（川崎地質（株）および応用地質（株））が開発した 2 種類の崩落検知システム（速度型、加速度型）を設置した。また、崩落検知システムが落石・小崩落を検知したかどうかを検証するためのデータ取得用機器（振動計、監視カメラ、照明）、電源などの付帯設備を併せて設置した。

図 4.28 に全体的な計器配置の概要を、図 4.29 に仮設防護柵周辺の検知センサー等の配置の詳細を示す。

図 4. 28　全体的な計器配置の概要図

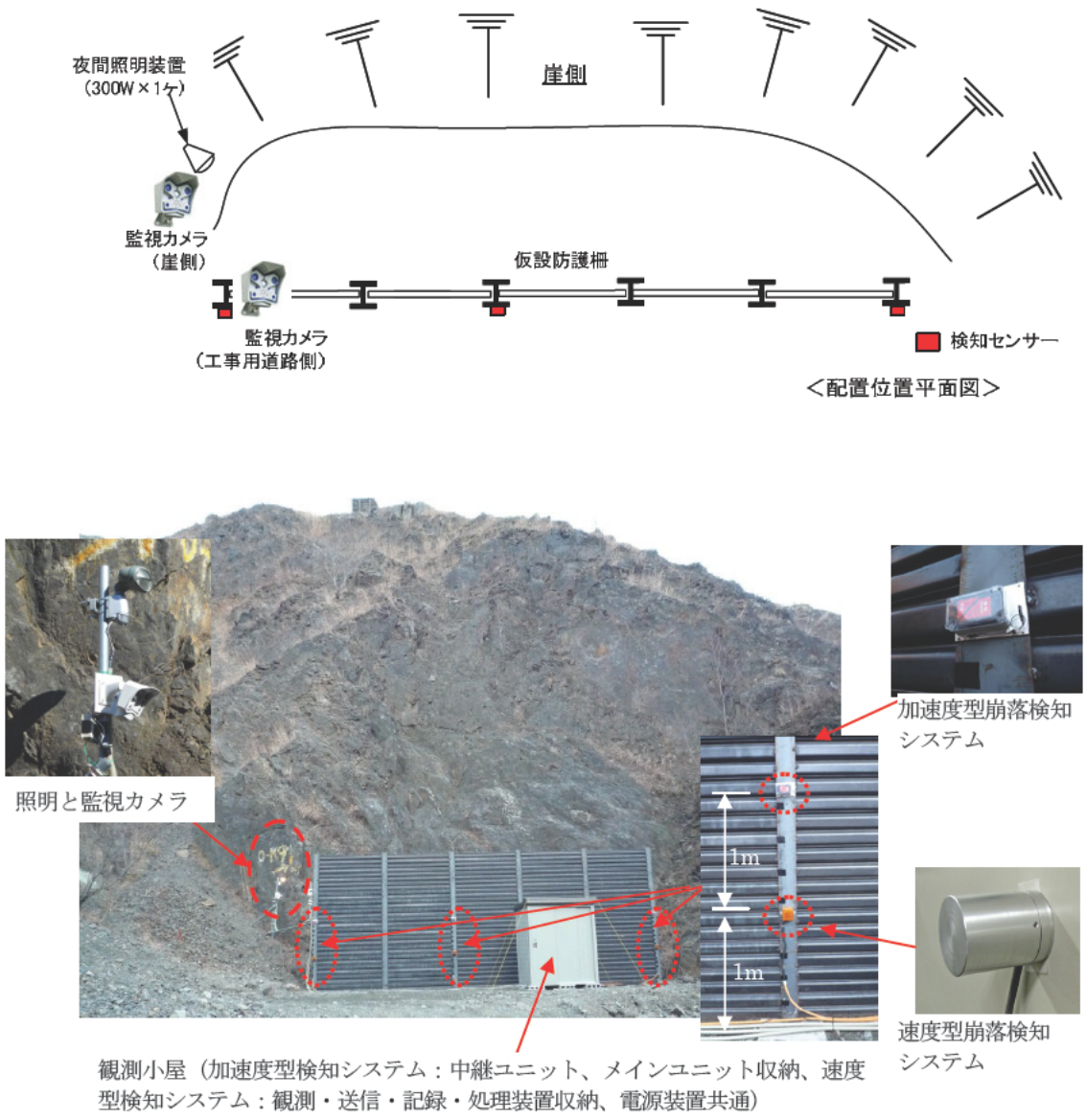


図 4.29　仮設防護柵周辺の検知センサー等の配置図

① **速度型崩落検知システム（仮設防護柵の落石・小崩落の規模を推定するシステム）**

- 今回の長期事象実験では、図 4.30 に示す「速度型落石検知システム（観測機器)」を使用した。
- 検知センサーとして、図 4.31 に示す固有周波数 14Hz の「速度型小型地震計」を 4 個使用した。 図 4.32 に示すように、3 個は仮設防護柵に設置し、1 個は背後の岩盤に設置した。設置の状況を図 4.33 に示す。
- センサーで検出された振動は監視ユニットで適宜増幅された後､計測ユニットに導かれ 16bit で A/D 変換されて常時メモリーに蓄積される。
- 振動が監視ユニットに設定したしきい値（トリガーレベル）を超えた場合にトリガー信号が発生し、計測ユニットではメモリーに保存しておいたプリ振動を含めて設定した時間分の振動波形データをハードディスクに保存する。
- 波形の種別判定や必要なフィルター処理は、処理ユニットで実施した。 本来、計測ユニットと処理ユニットはネットワークで接続され、振動を検知され波形が保存されると自動的に処理を開始するが、計測ユニットの通信機能が不安定であったため、波形データを回収した後に室内で処理を行った。
- 波形データに対して 200Hz～600Hz のデジタルバンドパス・フィルター処理を行った後で、各成分の最大振幅値、卓越周波数、振動継続時間を自動抽出すると共に, これらの各パラメーターから波形の種別を判別して、別途ファイルに保存した。
- なお、振動継続時間で 0.1 秒以下の波形については「空電ノイズ」とした。

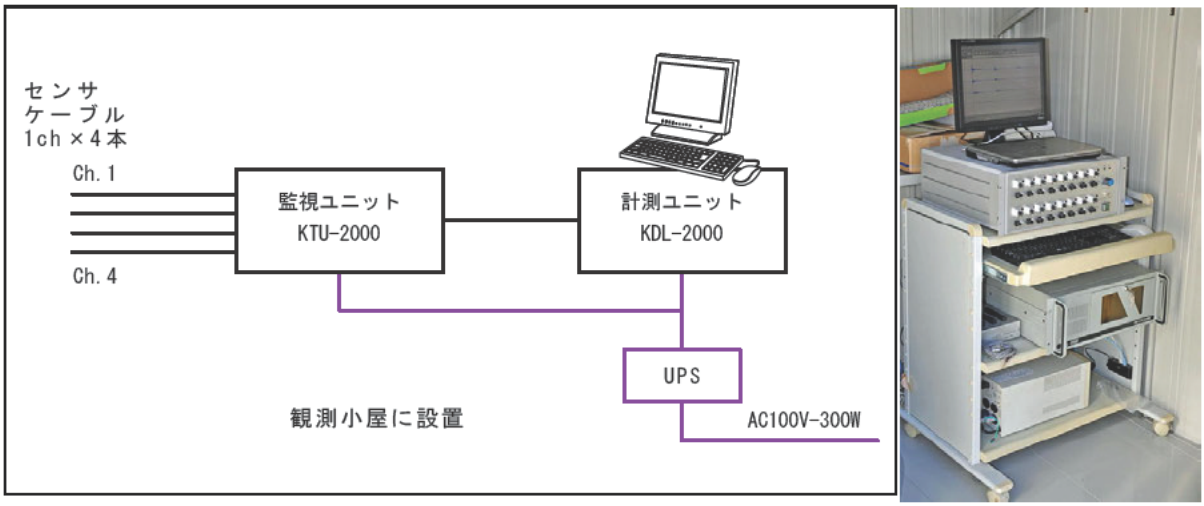


図 4.30 速度型落石検知システムの構成（左）と検知システムの外観（右）

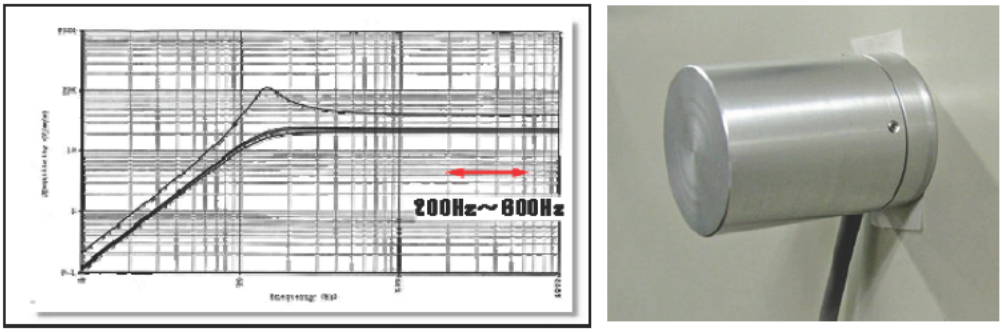


図 4.31 速度型落石検知システムの周波数特性（左）と小型地震計（右）

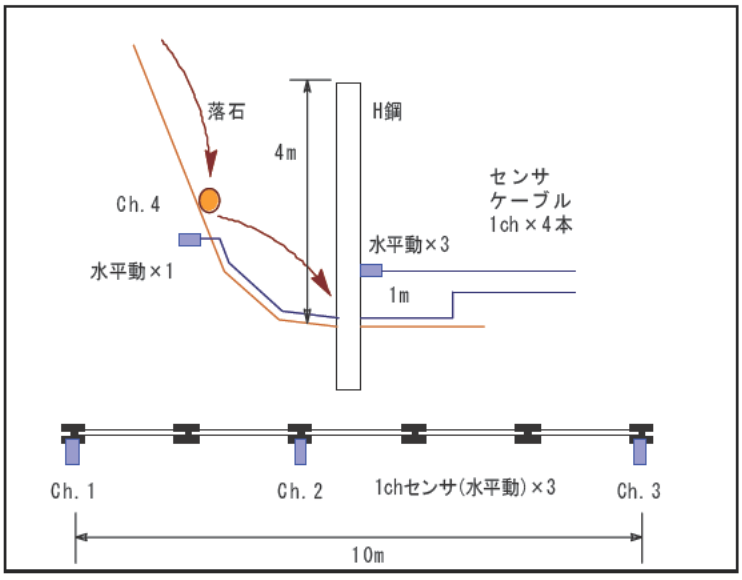


図 4.32 落石検知センサー（小型地震計）の設置位置

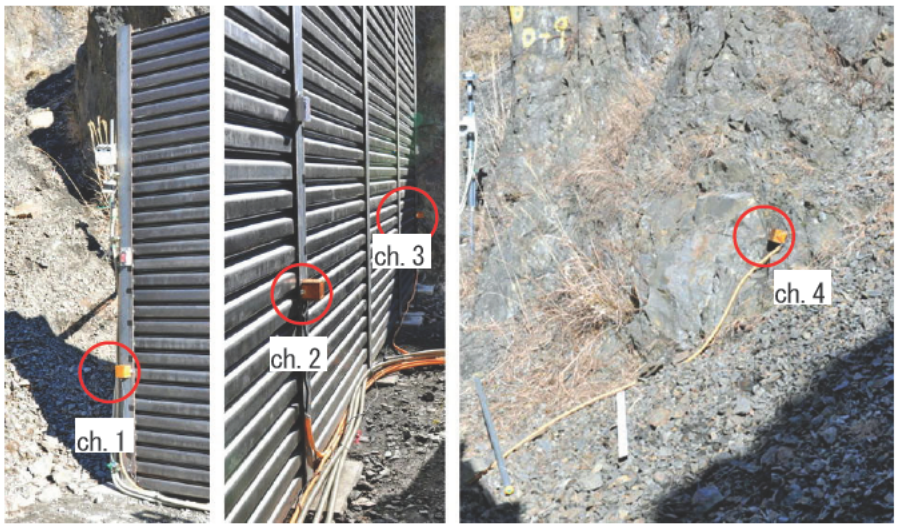


図 4.33 落石検知センサー（速度型小型地震計）の設置状況

表 4.3 速度型落石検知システムの主な性能

機器名	型 番	台数	概 略 仕 様	
小型地震計	SM-4/B	4	形　　式	MC型速度地震計（水平動）
			固有周波数	14Hz
			周波数特性	10Hz～1kHz
監視ユニット	KTU-2000	1	成 分 数	16 （内，4chのみ使用）
			周波数特性	10Hz～1KHz
			増 幅 度	×1，×2，‥‥，×100
			しきい値	10mKine～1Kine（連続可変），OR方式
計測ユニット	KDL-2000	1	A/D分解能	16Bit
			サンプリング	2KHz（最大4kHz，全ch同時）
			記 録 長	4秒間
			その他機能	プリトリガー方式，停電時自動復帰
処理ユニット	Windows PC	1	自動検出パラメータ	検出時刻，検出ch，各chの最大振幅，検出chの卓越周波数と継続時間
			フィルター	200Hz～600Hz（40db/oct）
			振動種別	落石，発破（段発），自動車，ノイズ他 落石判定条件：振動継続時間0.1秒以上

② 加速度型崩落検知システム（仮設防護柵への落石・小崩落の発生のみを検知するシステム）

- 加速度型崩落検知システムは、図 4.34 に示すように検知ユニット、中継ユニットおよびメインユニットの３つのユニットから構成される。検知ユニットは図に示すとおり、仮設防護柵 3 箇所（H 形鋼）に取り付けた。
- 図 4.35 に検知ユニットの検知フローを示す。図に示すように検知ユニットは、微振動センサー（ボール接点方式、3 軸）と加速度センサー（MEMS 半導体ピエゾ抵抗、3 軸、）を用いた 2 段階の検知方式を採用している。この微振動センサー方式を採用したのは、微振動センサーによる ON/OFF の制御によって加速度センサーの消費電力を抑えるためである。
- 微振動センサーにより 30gal 以上の振動が検知された場合、加速度センサーは測定を開始する。加速度センサーによって測定された振動データは、マイコンレベル（10bit）の演算処理回路に設けたデジタルフィルター（ハイパスフィルターとローパスフィルターの組み合わせ）により、防護柵の振動特性を踏まえて予め設定した周波数帯域によりフィルタリングされる。
- フィルターを通過した特定周波数の波形データと振幅レベル（3 軸の合計値）およびレベル超過回数により設定したしきい値で比較し、超過した場合に「崩落検知」として抽出する。
- 検知ユニットの検知情報は、中継ユニットを介して、メインユニットに伝えられる。ここで、直後の 2 台目以降の検知ユニットからの検知情報は中継ユニット側で受信拒否し、不感知時間 10 秒間は受信待機する。このようにして、複数の検知センサーによる同一崩落の検知を防いでいる。言い換えれば、10 秒毎の検知＝崩落イベント単位と仮定している。
- 検知ユニット～中継ユニット～メインユニット間の通信は、430MHz の特定小電力無線を使用する。中継ユニットを介した見通し距離で最大約 200mの通信が可能である。
- 中継ユニットから検知情報を踏まえ、メインユニットではブザーの鳴動、外部警報装置の起動やネットワークを通じた検知メール送信を行う。（本来検知情報はメインユニットからネットワークを通じて遠隔地に送られるが、実験箇所はネットワークが使えなかった。このため、別途データロガーを接続し、時刻 10 分毎の検知回数を記録した。）
- なお、加速度型崩落検知システムには波形データを記録するロガー機能が付いていない。したがって、検証用として加速度型崩落検知システムが検知した振動の波形データを別途測定・記録するための振動計（加速度型）およびデータロガーを設置した。この振動測定装置はトリガー機能によって崩落検知システムと同じ検出レベルで振動を測定し、検知前 1 秒を含む前後 5 秒間の波形データを記録できるように設定した。
- 表 4.4 に加速度型崩落検知センサと検証用の加速度型振動計の主な仕様を示す。

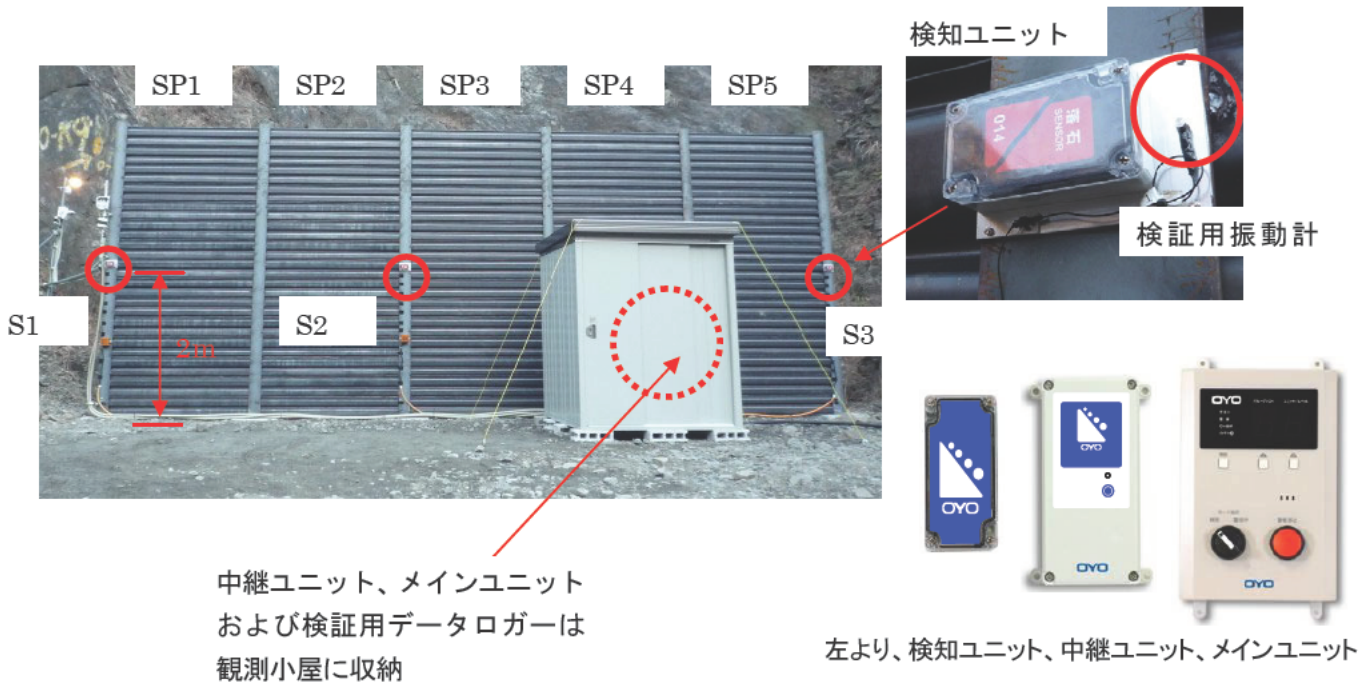


図 4.34　加速度型崩落検知システムの設置状況と構成

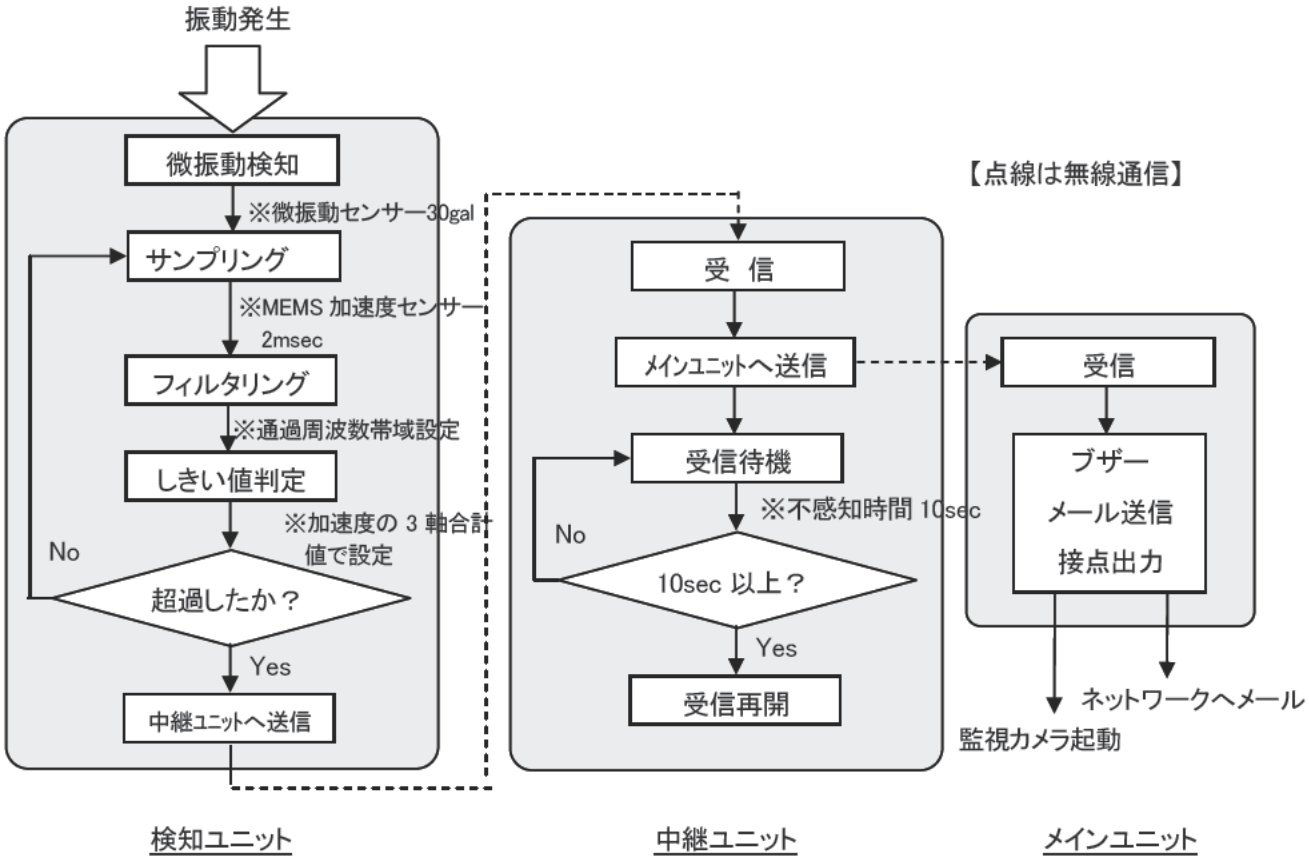


図 4.35　加速度型崩落検知システムの検知フロー

表 4.4　加速度型崩落検知センサーと検証用振動計の主な仕様

名称		型番	数量	主な仕様	
崩落検知センサー		ー	3 （他、中継ユニット1、メインユニット1）	電源制御	微振動センサー（ボール接点方式、3軸）
				振動測定形式	MEMS加速度（半導体ピエゾ抵抗、3軸）
				周波数	10Hz～500Hz
				加速度測定範囲	±4G（最小分解能0.05G）
				サンプリング	2msec
				A/D分解能	10bit
				無線通信方式	特定小電力無線430MHz
検証用振動測定装置（波形データ取得）	振動計（加速度計）	PV-90G	3	振動測定形式	圧電式加速度
				周波数	1Hz ～ 25kHz
	データロガー	NR600+ NR-CA04	1	入力チャンネル	4ch最大増設時20ch
				サンプリング	10μs（100kHz）～60s
				A/D分解能	16bit

③ 監視カメラおよび付帯設備

- 崩落検知システムが検知した振動の原因を調べるとともに、崩落の規模・状況を把握するために、監視カメラと記録用のファイルサーバーを設置した。図 4.36 に設置状況を、表 4.5 に仕様を示す。
- 図に示すように監視カメラは崖側と工事用道路側の 2 方向を撮影するため、2 台設置した。監視カメラは上述の検証用振動計と連動させ、検知前 1 秒を含む前後 5 秒間の画像データの他、音声データも記録できるように設定した。
- 夜間の崩落状況を確認するため、夜間のみ点灯する照明設備を崖側の監視カメラに併設した。
- その他の機器として、監視カメラデータをファイルサーバーに送るための HAB（電源も供給可能な PoE 給電タイプ）、停電時対策、避雷対策のための装置（無停電電源装置、サージアブソーバー）を設置した。図 4.37 に加速度型崩落検知システムと合わせた全体構成を示す。

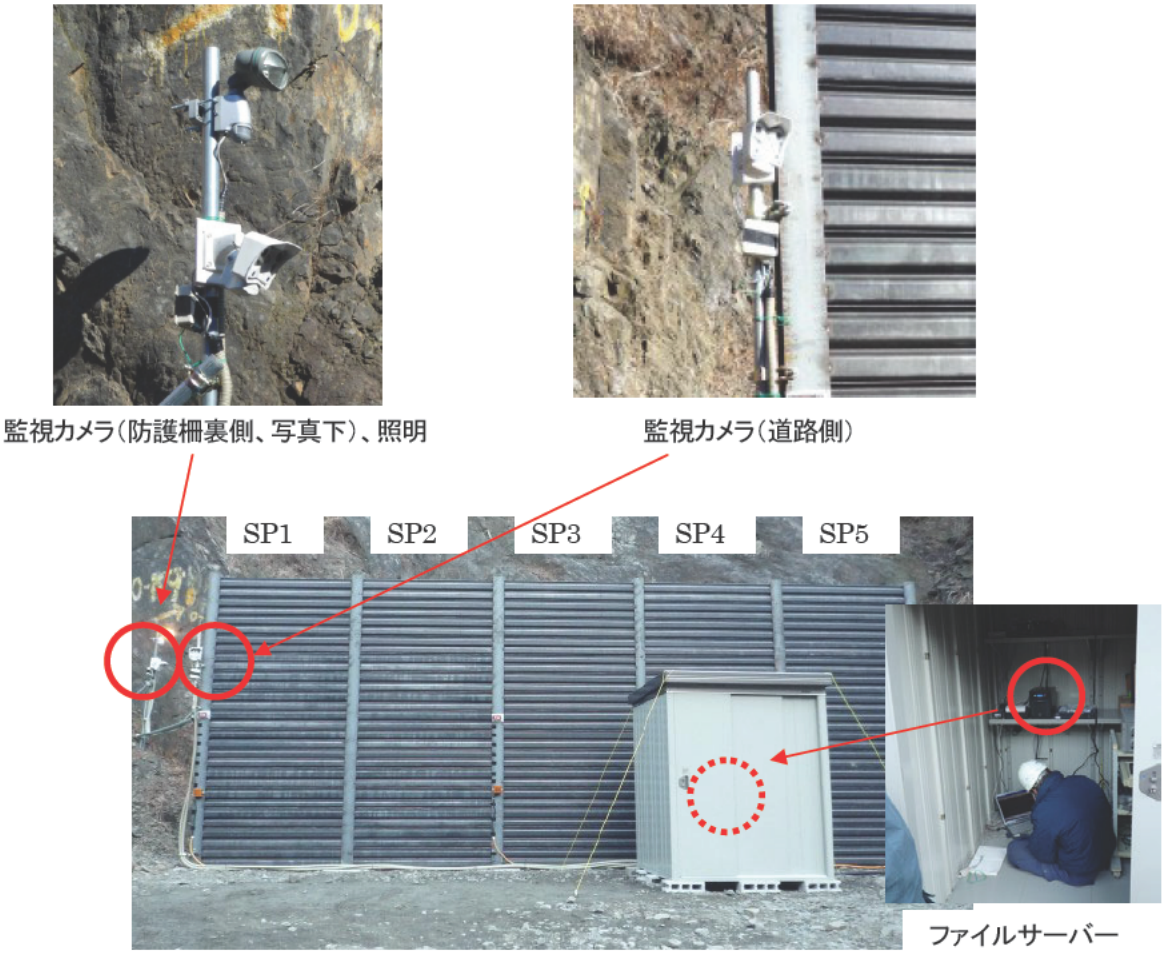


図 4. 36　監視カメラおよび付帯設備設置状況

表 4.5　監視カメラおよび付帯設備の主な仕様

名称		型番	数量	主な仕様	
監視カメラおよび付帯設備	監視カメラ	M12D Sec DayNight D43 N43	2	最大画像解像度	昼間：カラー、2048×1536（約300万ピクセル） 夜間：白黒、1280×960（約120万ピクセル）
				最低被写体照度	カラー：1lux（t＝1/60秒）、0.05lux（t=1/1秒） 白黒：0.1lux（t＝1/60秒）、0.005lux（t=1/1秒）
	監視カメラデータ格納用ファイルサーバー	TS-XH4.0TL/R6	2	データ収録容量	2TB 2台のうち、1台はデータ回収時の交換用

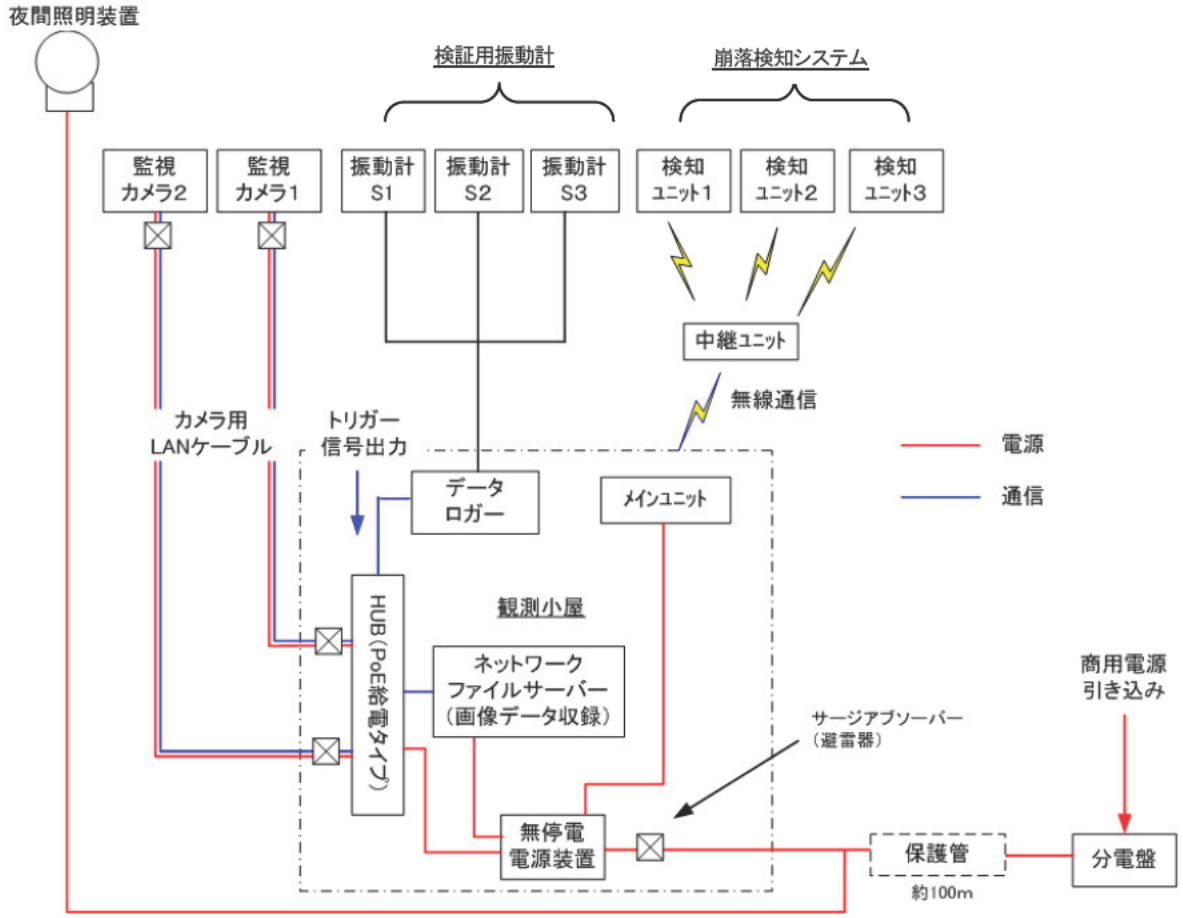


図 4.37　加速度型崩落検知システムと監視カメラ等のシステムブロック全体図

4.4.3 実験結果

長期検証実験は、平成 22 年 12 月 8 日～平成 23 年 4 月 22 日に実施した。しかし、原因不明の停電により、平成 23 年 1 月 12 日～2 月 22 日 の間は検知システムが停止したことに加え、3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震の影響で、その後計画停電が実施されたため、検知結果にこれらの停電期間は含まれていない。

また、検知システムは 4 月 11 日の夕刻から停止していたが、この原因は部品の故障であった。

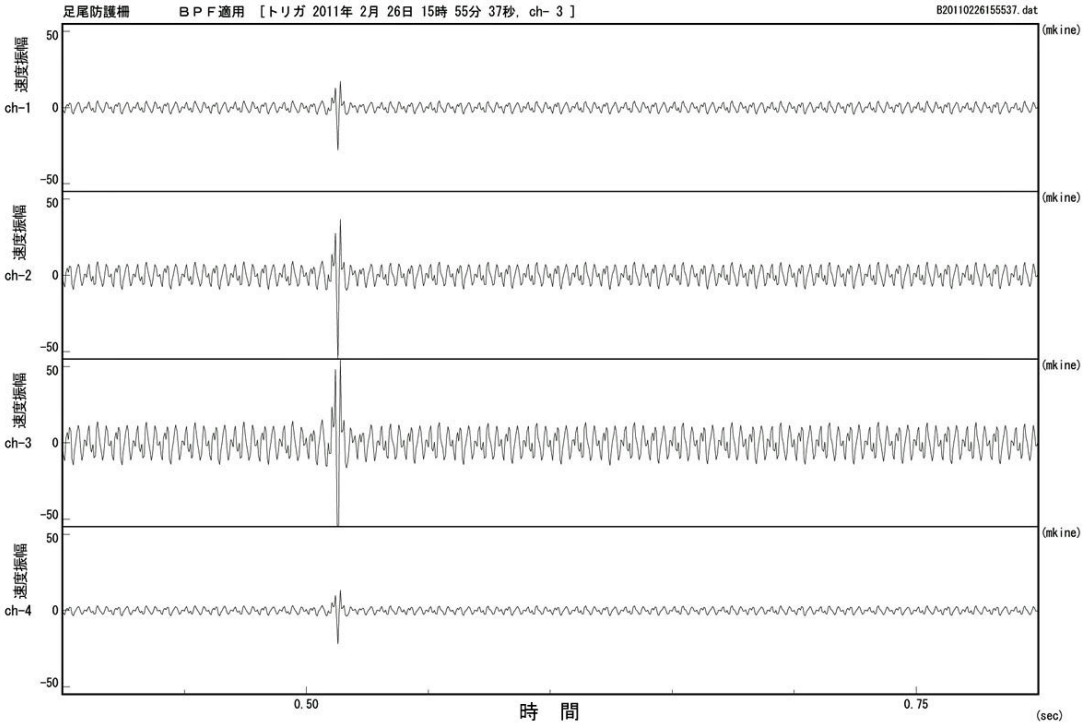
(1) 速度型崩落検知システム（仮設防護柵の落石・小崩落の規模を推定するシステム）

① 崩落検知パラメーター

長期検証実験では、表 4.6 に示す波形処理を行って空電ノイズを除去した。

表 4.6 波形処理パラメーター

種 類	概 略 仕 様		備 考
周波数帯	ローカット	200Hz（カットオフ：160Hz）	デジタルフィルター
	ハイカット	600Hz（カットオフ：800Hz）	デジタルフィルター
抽出条件	継続時間	0.1秒以上の波形のみ	0.1秒以下はノイズ
しきい値	速度振幅	停電前：15mKine 停電後：20mKine	空電ノイズ対策



注） グラフ上の波形振幅は実際の値の 4 倍となっているので、読み替えられたい（以後同様）。

図 4.38 空電ノイズ波形（例）

② 主な落石波形と周波数特性

（ｉ）2010/12/22 18:54:51 に発生した落石の波形

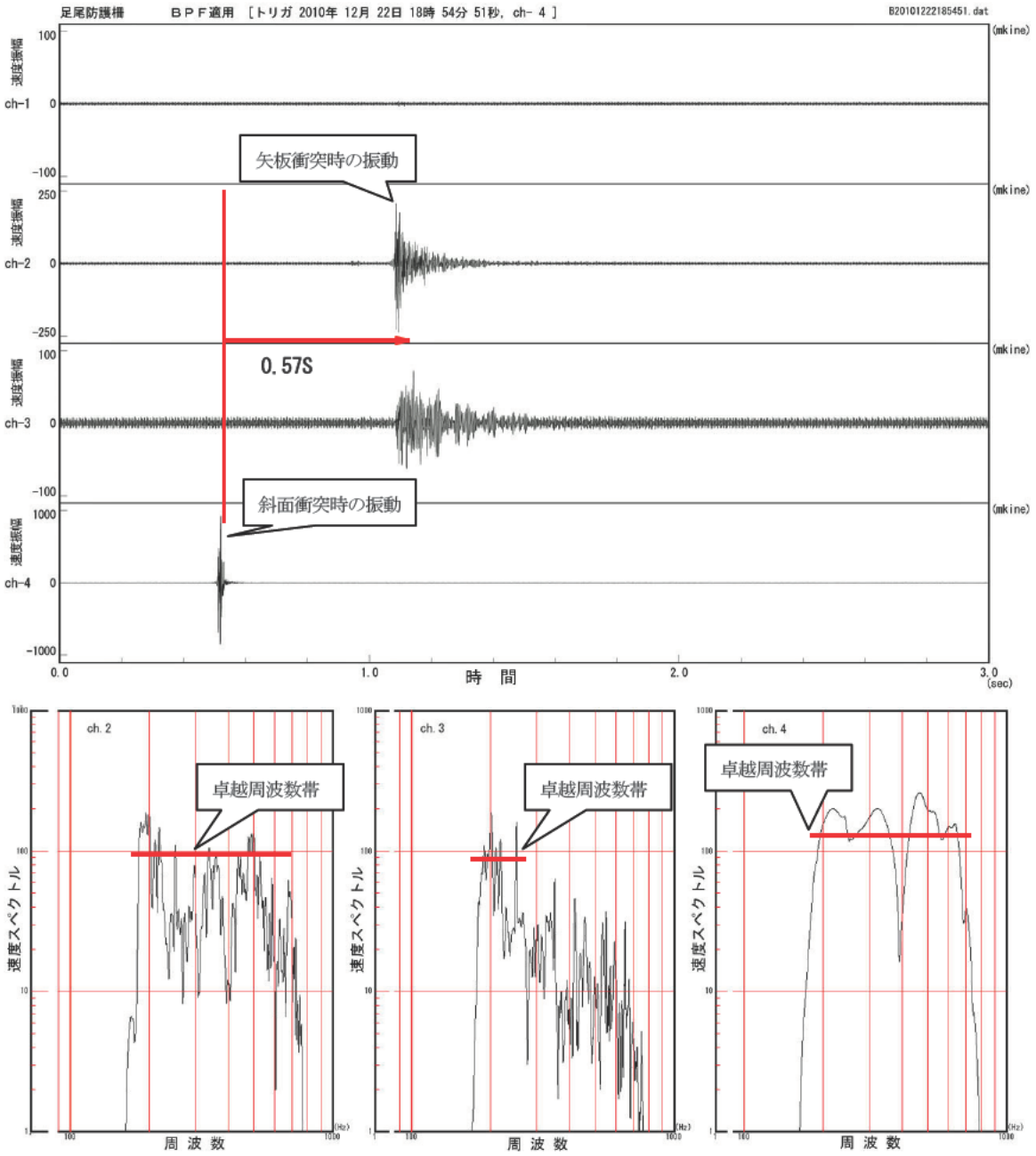


図 4.39 主な落石波形（2010/12/22 18:54:51）

- 岩盤に設置した ch.4 の近傍でバウンドした後、SP3 に衝突したと推定される落石の波形（衝突位置についての詳細は後述）を示す。
- 防護柵の ch.2 では、概ね 200Hz 前後と 500Hz 付近にピークが存在する。
- ch.3 では、250Hz より高い周波数帯域の振幅値は急速に低下する傾向を示している。
- 岩盤に設置した ch.4 は、200Hz～600Hz 間でほぼ同一の振幅を示している。

（ⅱ）2010/12/27 12:36:25 に発生した落石の波形

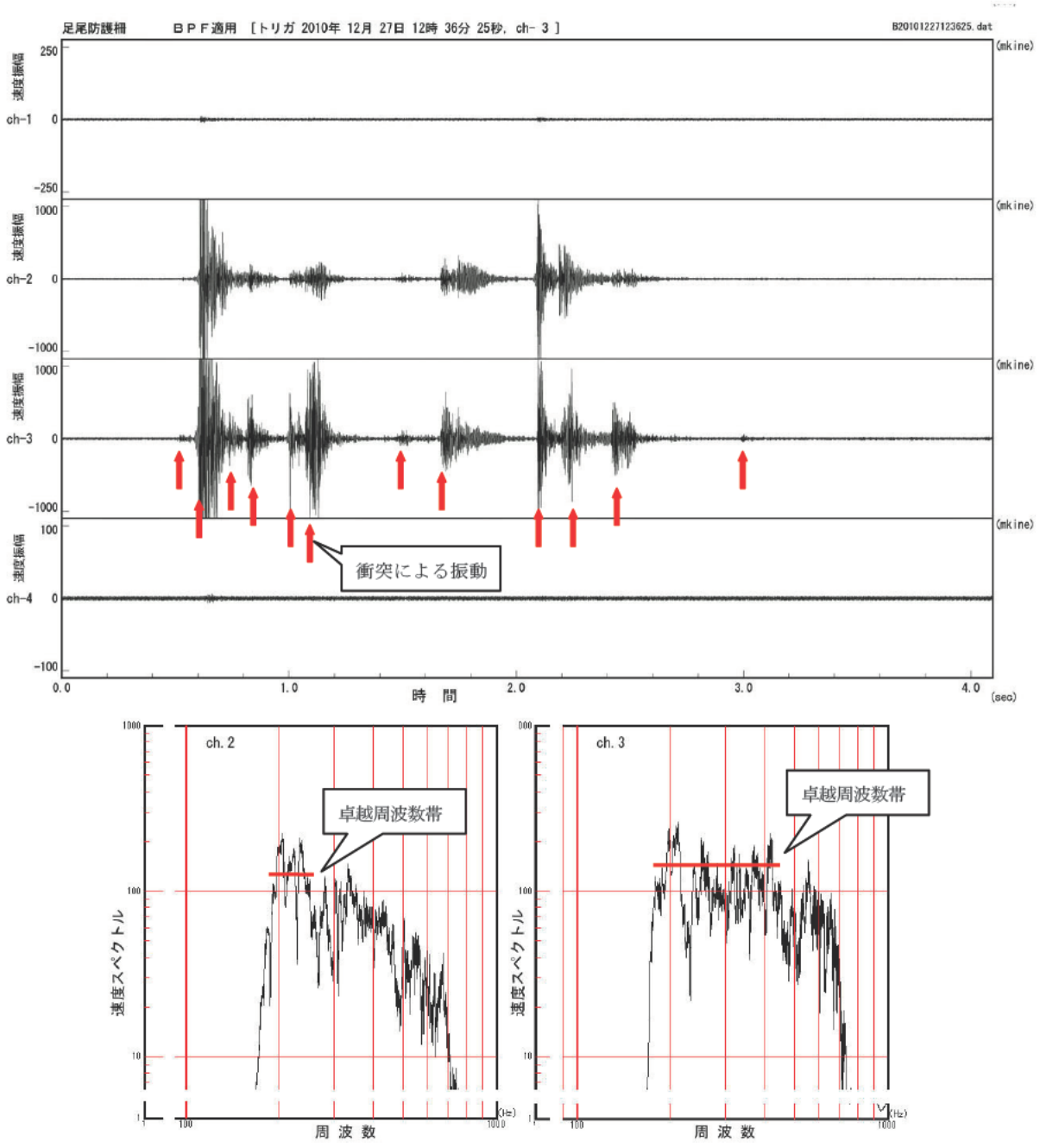


図 4.40 主な落石波形（2010/12/27 12:36:25）

- 大小合わせて 10 個～12 個の落石が衝突している（図中の矢印、以下同様）。
- 推定衝突位置は、SP5 である（衝突位置についての詳細は後述）。
- 波形から、各個別の落石を分離するにはかなり高度な波形処理が必要である。
- 防護柵の ch.2 では、概ね 200Hz～250Hz にピークが存在し、ch.3 では、200Hz～400Hz の帯域でほぼ同程度のピークが連続している。
- ch.2 では，350Hz より高い周波数帯域の振幅値は急速に低下する傾向を示している。

（iii）2011/03/07 14:31:46 に発生した巨大落石の波形

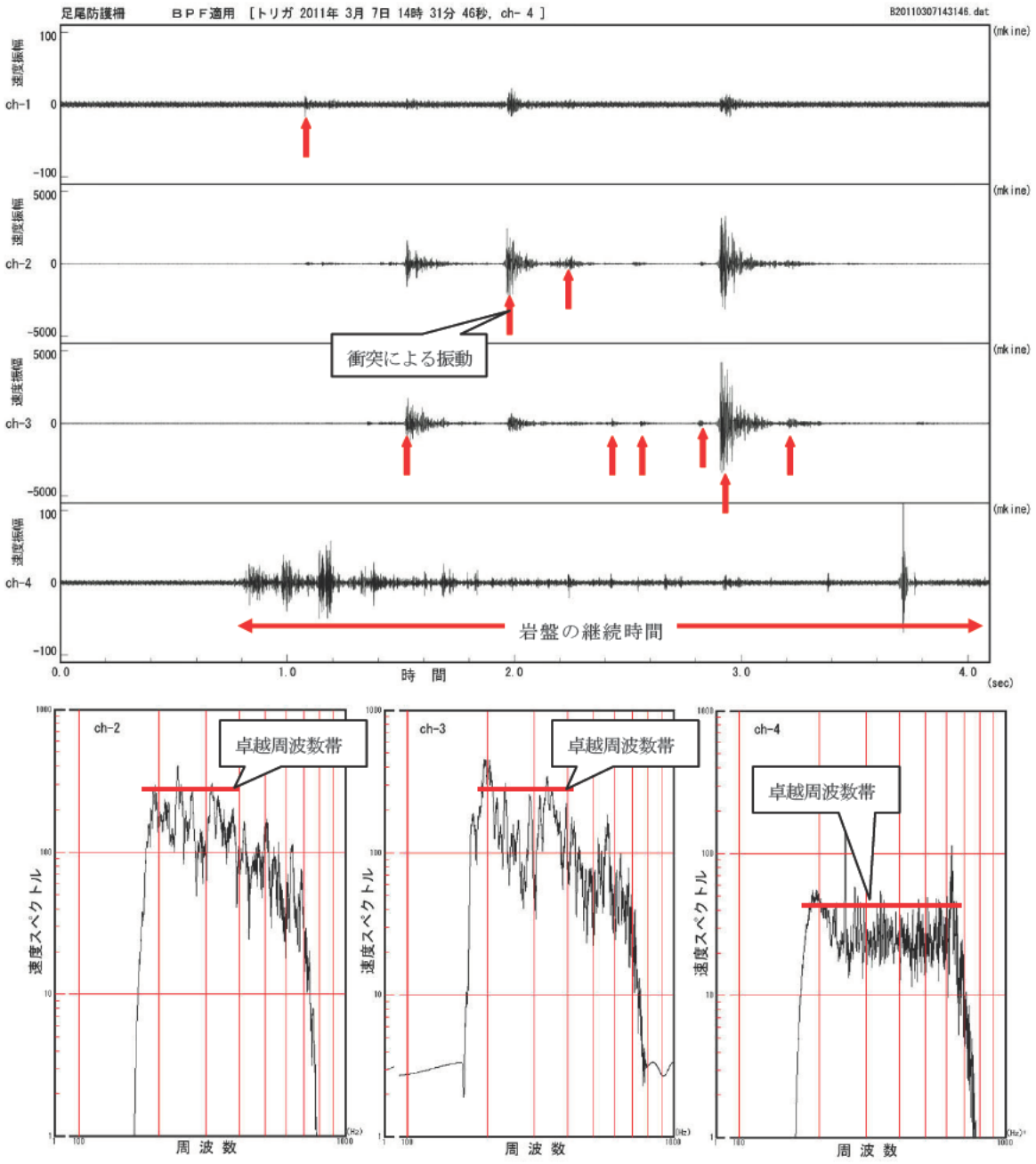


図 4.41 主な落石波形（2011/03/07 14:31:46）

- 大小合わせて 5 個～10 個の落石が衝突している。
- 岩盤（ch-4）における波形の継続時間が長いことから、土砂状あるいは連続して滑り落ちる現象が生じていることを示唆している。
- 推定衝突位置は、SP4 である（衝突位置についての詳細は後述）。
- 岩盤の ch.4 では、200Hz～600Hz の帯域でほぼ同じ程度の値を示しているが、防護柵の ch.2 と ch.3 は共に，200Hz～350Hz にピークが存在する。

（iv）2011/03/07 15:12:16 に発生した巨大落石の波形＞

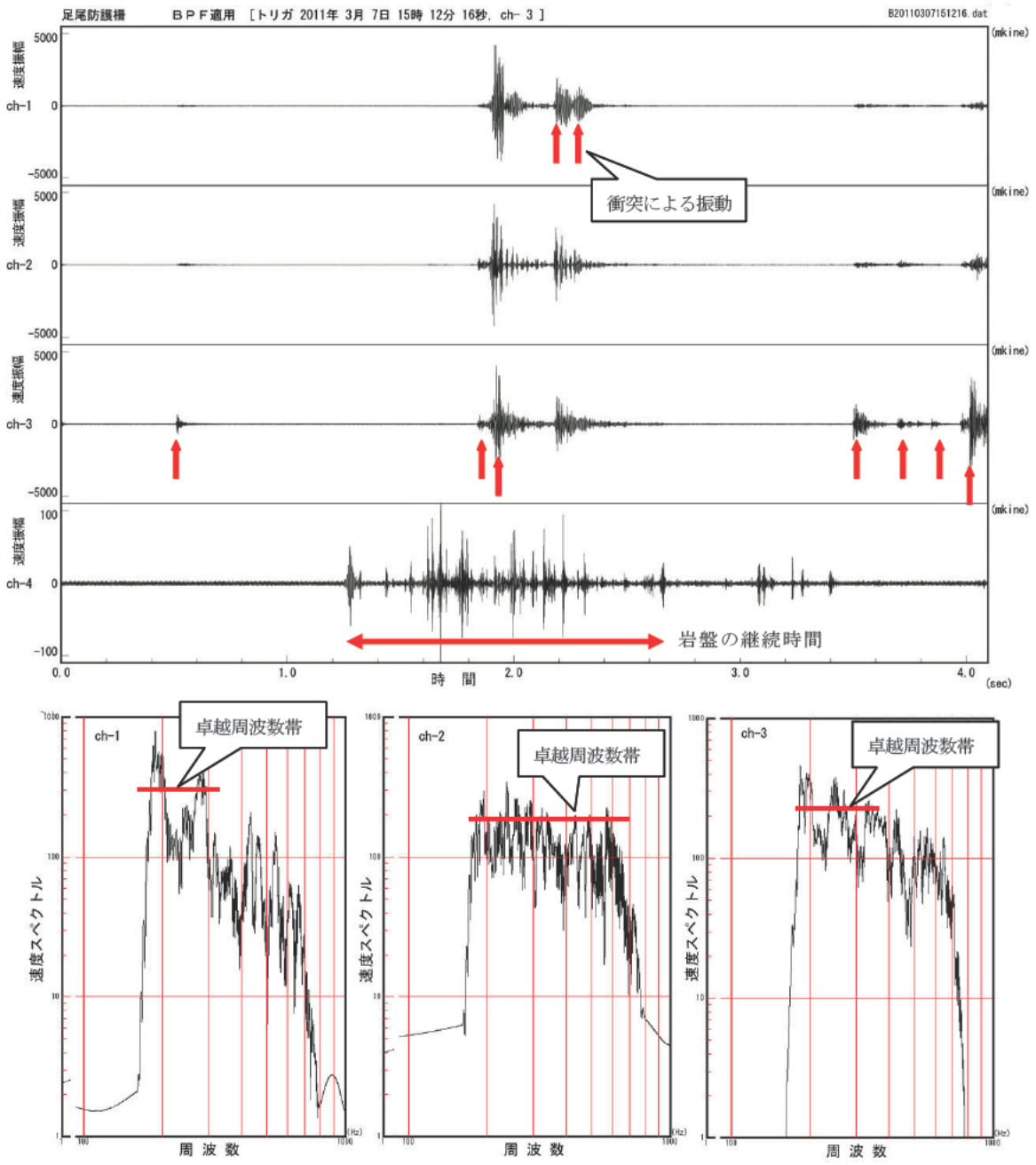


図 4.42 主な落石波形（2011/03/07 15:12:16）

- 観測期間中、最も大きな振幅値を示した落石である。
- 岩盤の速度波形の継続時間が長いことから、土砂状あるいは連続して滑り落ちる現象が生じたことを示唆している
- 推定衝突位置は、SP3 である（衝突位置についての詳細は後述）。
- ch.2 では、200Hz～600Hz の帯域でほぼ同じ程度の値を示しているが、ch.1 は概ね 180Hz～200Hz にピークが存在し，ch.3 では概ね 180Hz～350Hz にピークが存在する

（ｖ）東北地方太平洋沖地震時に発生した落石の波形

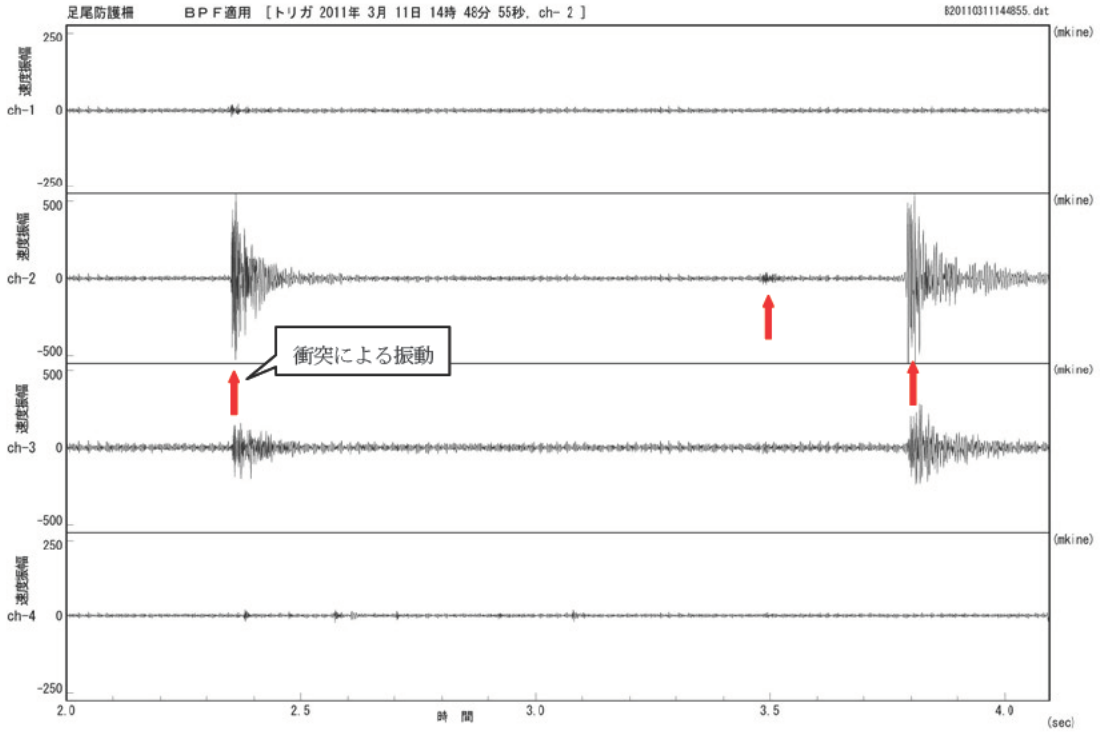


図 4.43 東北地方太平洋沖地震時に発生した落石の波形（2011/03/11 14:48:55）

・東北地方太平洋沖地震の直後に発生した落石を５回検知した。

主な落石の周波数特性から、以下のような傾向が明らかとなった。

仮設防護柵に設置した速度型振動計で観測した落石振動の周波数は、落石によってある程度のバラツキが存在するものの、概ね 180Hz～350Hz にピークが１つあるいは複数存在するため、この周波数帯を使用すれば「落石による衝突振動を検知できる」ことが確認された。

③ 長期検証期間における落石イベント

表 4.7 は、速度型崩落検知システムによる落石イベント数である。なお、各落石の振動パラメーターについては、巻末資料に掲載した。

表 4.7 速度型検知システムによる落石イベント数

センサー	検知数	鋼矢板
ch1	2	119
ch2	69	
ch3	48	
ch4	16	ー
合 計	135	119

（ｉ）鋼製横矢板で検知した落石振動の傾向（周波数）

図 4.44 は、鋼製横矢板で検知した全ての落石振動の卓越周波数の分布状況である。

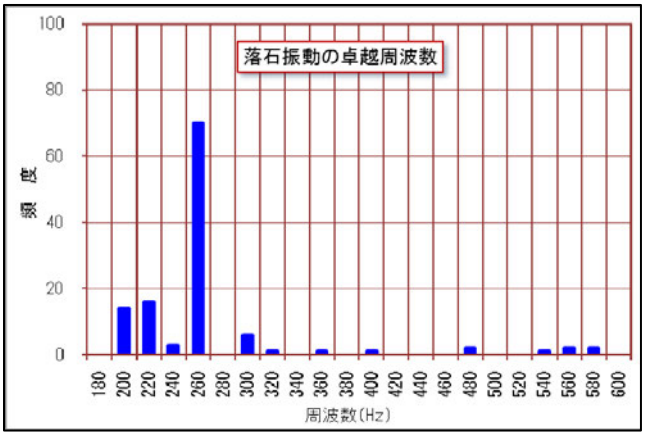


図 4.44 鋼製横矢板で検知した落石振動の卓越周波数

- 最も多く検出した卓越周波数は 260Hz 帯であり、検知総数 119 波形に対する比率は 59%であった。次いで，220Hz 帯及び 200Hz 帯が多くそれぞれの比率は 13%と 12%であった。
- 数%の 240Hz 帯を加えると、200Hz 以上 300Hz 未満の卓越周波数の比率は 85%以上である。検知センサーとして採用する周波数帯を、200Hz～400Hz ないしは 200Hz～500Hz に限定できる可能性がある。

（ⅱ）鋼製横矢板で検知した落石振動の傾向（振幅値）

図 4.45 は、鋼製横矢板で検出された最大振幅と累積頻度の関係である。

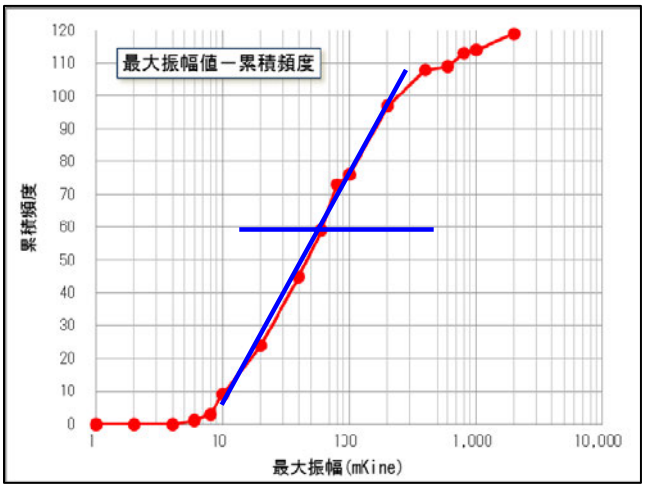


図 4.45 最大速度振幅と検知した累積頻度の関係

- 検知した最も小さな（ピーク）振動値は約 4mKine であり、最も大きな（ピーク）振動値は約 1,420mKine（1.4Kine）であった。
- 累積頻度の中央値は約 60mKine であった。
- 速度振幅値で 10mKine から 200mKine の間では、最大振幅の対数と検知個数の間にほぼ直線の関係が存在するようである。

（ⅲ）鋼製横矢板で検知した落石振動の傾向（振動エネルギー）

地震学では、ある広がりをもった地域で、一定以上の期間内に起こった地震は、「マグニチュード」と「その発生個数の対数」との間に直線的な関係が成立するという特徴がある。 これをグーテンベルグ・リヒター（Gutenberg-Richter）の関係式といい、以下の式で表される。

$$\log n\,(M) = a - b \cdot M \qquad (1)$$

ただし、M はマグニチュード、n（M）はマグニチュード M の地震の発生個数（頻度）、a と b は定数である。

（1）式から「b」が大きいほど相対的に大きな地震が多くなることがわかり、「a」や「ｂ」は地域性などによってある程度の違いが見られる。

長期検証実験の結果を適用するに当たり、前提条件として、マグニチュードは厳密に求めることが困難なので、「最大振幅×継続時間」で計算される値を「振動エネルギー（E)」として採用し、（E）の対数値「log （E)」をマグニチュードの代用とした。

図 4.46 は、鋼製横矢板で検出された落石振動の振動エネルギーと累積頻度の関係である。

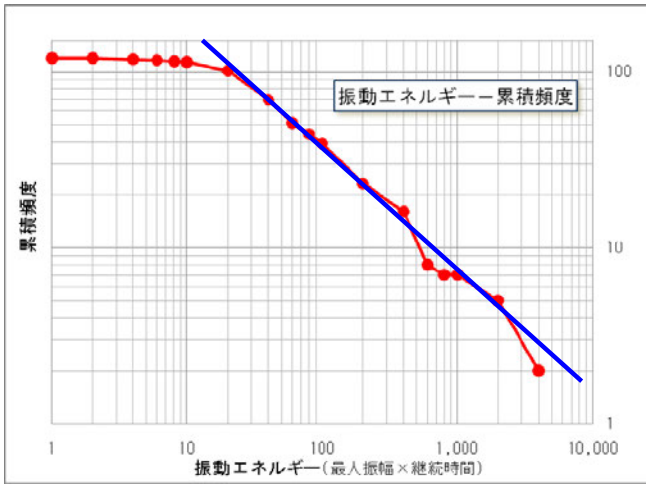


図 4.46 鋼製横矢板で検知した落石の振動エネルギー（E）と検知累積頻度（n（E））の関係

- 振動エネルギー（最大速度振幅×継続時間）の 20～4,000 の間では、グーテンベルグ・リヒターの関係式とほぼ同様の傾向が見られる。
- （1）式を log n（E） = a - b・log （E） に変形して求めた結果、a =2.6 、b =0.6 となった。 注：日本と近海の地震では、a は 7～8 、b は=1 前後であることが多い。
- 振動エネルギーが 4,000 を超える落石の検知数が少なくなっているが、これは、観測期間が短いために発生（検知）に至っていない。振動エネルギーが 20 より低い落石は、発生個数が極めて多いことが予想されるが、「仮設防護柵まで届かない」あるいは「発生する振動の大きさがノイズ以下である」のいずれかであると考えられる。

（ⅳ）落石イベントの時間的変化

図 4.47 と図 4.48 は、1 時間ごとに集計した全ての落石イベント（頻度）と累積数のグラフである。

平成 23 年 1 月 12 日～2 月 22 日の間（欠測期間）と、4 月 11 日以降は落石イベントデータが無いので、グラフは 12 月 10 日~1 月 11 日と 2 月 23 日~4 月 11 日の 2 つに区分した。参考のためアメダス足尾での 1 時間降水量（＝1 時間に降った総雨量）も併記した。

なお，図中に示した「検知数/1 時間」は 1 時間ごとに集計したイベント数、「雨量/1 時間」は 1 時間降水量のことである。

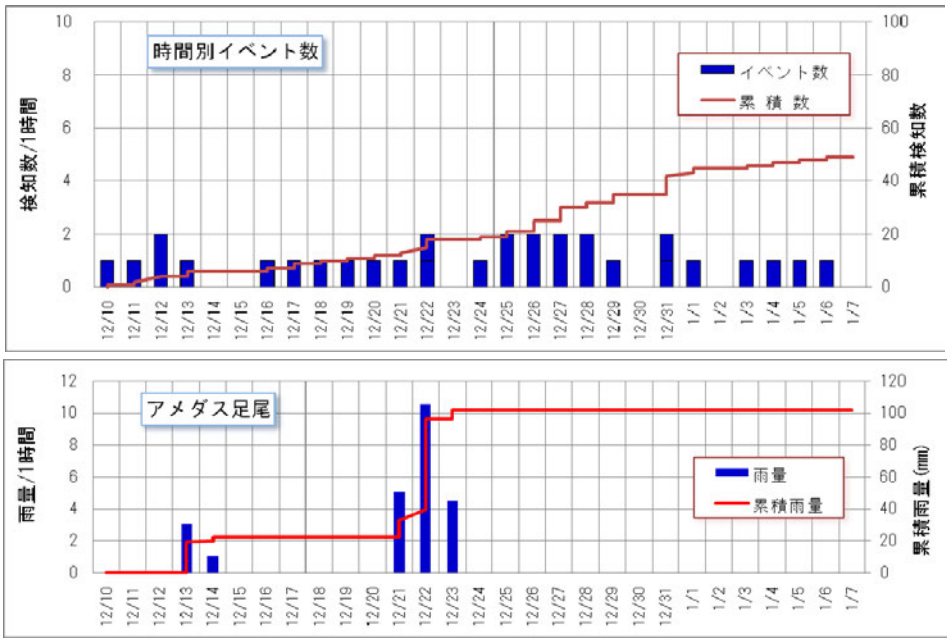


図 4.47 1 時間ごとに集計した落石のイベント（頻度）・累積数（12/10～1/7）

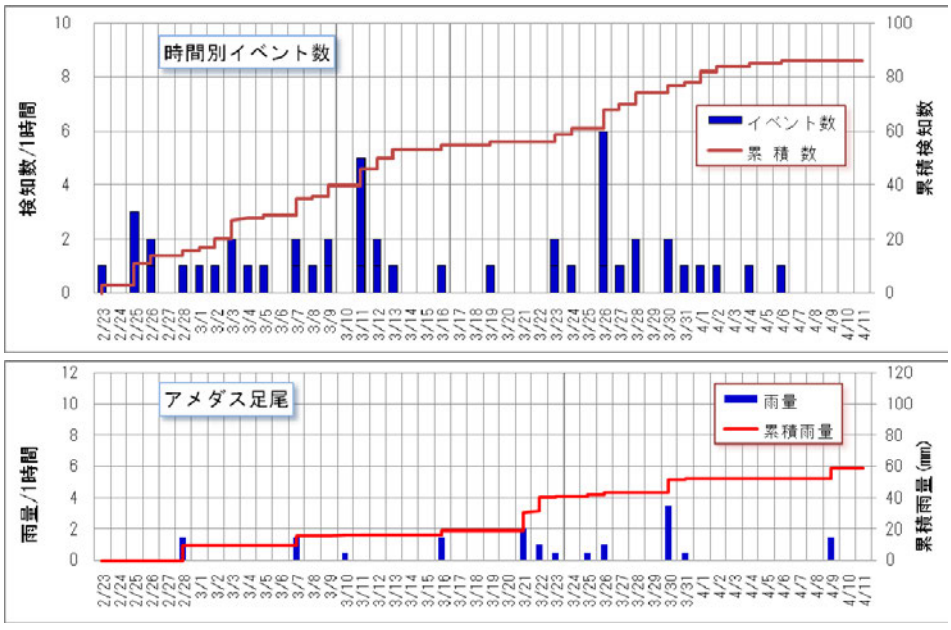


図 4.48 1 時間ごとに集計した落石のイベント（頻度）・累積数（2/23～4/11）

- 4 月 7 日から 11 日の午後に検知システムが停止するまでの間、空電やその他のノイズは検知したが、落石によるイベントは検知しなかった。このため、落石イベントと時間変化との関係について分析ができなかった。
- 3 月 26 日に 1 時間に 6 個の落石を検知したが、雨量はわずかであって両者に明瞭な関係は見られなかった。
- 雨量に影響を受けたと思われるものは 12 月 22 日であるが、時間当たりの検知数（イベント数）は 2 個であるが、この 2 個という値は他の時間帯にも数多く存在するため、確実に雨の影響とは断定できない。
- 3 月 11 日の時間別検知数が多いのは、東北地方太平洋沖地震による揺れの影響である。

（v）落石振動エネルギーの時間的変化

図 4.49 は、1 時間ごとに集計した全ての落石の振動エネルギーと累積値のグラフである。

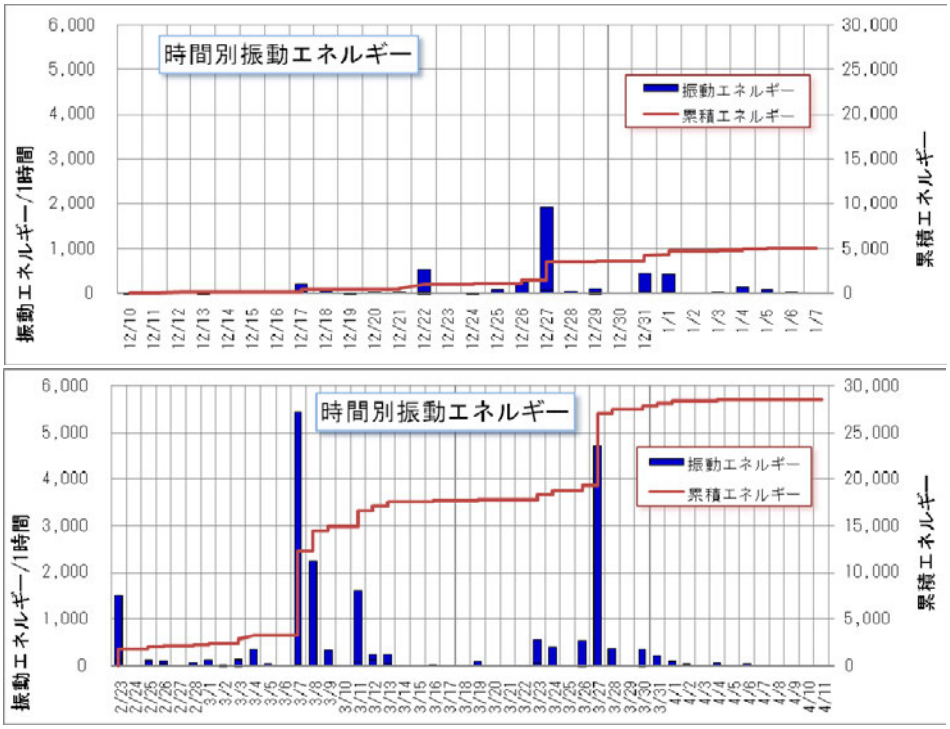


図 4.49 1 時間ごとに集計した落石振動エネルギー

- 時間別に集計した落石イベントグラフ（図 4.47）は、落石発生（検知）数のみであるが、振動エネルギーのグラフではある程度落石の規模が反映されている。
- 観測期間中最も振動エネルギーが大きい落石は、3 月 7 日と 3 月 27 日に発生し、次いで 12 月 27 日に発生した。
- 3 月 7 日の場合、アメダス足尾では 6mm の雨量を観測しているが、雨量の値から見てその影響であるか偶然であるかは判然としない。

(vi)落石が衝突した位置の推定

事前基礎実験で実施した振り子方式衝撃実験で求めた「衝撃位置－平均速度振幅比」のグラフを使用して、落石が衝突した鋼製横矢板を推定した。なお、各落石振動の個別数値については、巻末資料にまとめた。

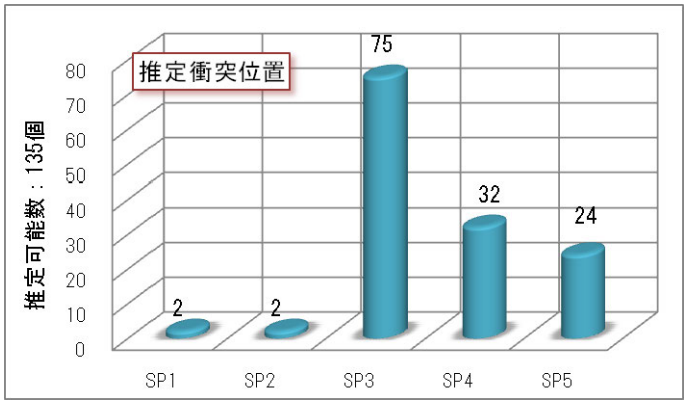


図 4.50 落石の推定位置

- 圧倒的に SP3 が多く、次いで SP4 と SP5 が多い結果が得られた。
- SP3～SP4 における推定衝突位置は、監視カメラで確認された衝突位置とほぼ同じ結果が得られたが、SP1 と SP2 での推定衝突位置は異なっていた。これは、速度型崩落検知システムの検知レベル（トリガーレベル）が、加速度型崩落検知システムのそれよりも相対的に大きく設定されていたため、SP1 と SP2 に衝突した落石を検知しなかったものと考えている（加速度システムのイベント数は 200 を遙かに超えている）。

(vii)落石の推定衝突位置の検証

表 4.8 に示す落石の推定位置精度は、監視カメラによって確認された鋼製横矢板の位置を元にして算出した結果であって、1 スパン離れている場合は「△」、2 スパン以上離れている場合は「×」とし、それ以外は「○」とした。

表 4.8 落石の推定位置精度

種　類	個　数	比　率	平均振幅	備　考
○	39	72.2%	255.3	
△	11	20.4%	90.3	隣のスパン
×	4	7.4%	56.3	2スパン離れ
合　計	54	100.0%	（mKine）	

平均振幅とは各最大振幅値を平均した結果

- 精度の計算に使用した検知数が少ないのは、同時に監視カメラで確認できた数が少なかったためである。
- 1 スパンの誤差を許すならば 90%以上の正答が得られており、位置の推定精度は極めて高いと評価できる。

・ 精度と平均振幅値には明瞭な相関があり、精度良く位置を推定するためにはある程度以上の落石規模（大きさ：質量）が必要であることが判明した。
・ この決定技術は仮設防護柵のように検知センサーを一列に配置するケースのみならず、洞門や待ち受け工のような構造体の天盤部分に、平面状に設置することも可能である。

（ｖ）落石の推定質量（参考）

事前基礎実験で実施した振り子方式衝撃実験で求めた「SP4 における鉄球質量－平均速度振幅」のグラフを使用して、落石の質量を推定した。 使用した落石センサーは全て ch3 のみである。

ただし、落石が鋼製横矢板に衝突する時の速度（衝突速度）を考慮していないので、あくまでも参考データとして取り扱うことにしたい。 落石の推定質量に併せ、監視カメラによって推定された落石の質量を併記した。

表 4.9　SP4 における落石の推定質量

No.	検出日時		使用 CH	最大振幅 mKine	落石質量 （推　定）	落石質量 （TVカメラ）
9	2010/12/17	12:37	3	35	0.1kg以下	－
10	2010/12/18	10:24	3	90	0.2kg以下	－
15	2010/12/22	00:34	3	32	0.1kg以下	－
27	2010/12/27	12:30	3	174	0.5kg	10個以上
28	2010/12/27	12:36	3	648	10kg	φ20mm以上
44	2011/1/1	10:19	3	211	0.5kg	－
51	2011/02/23	11:25	3	45	0.1kg	φ5mmぐらい
66	2011/03/01	08:35	3	328	3kg	φ10mm～
80	2011/03/07	14:31	3	1,201	50kg	φ20～30。SP4破損
87	2011/03/09	11:10	3	123	0.5kg	φ5～10mm
89	2011/03/10	15:01	3	161	0.5kg	φ3～5mm
95	2011/03/11	15:18	3	368	4kg	φ10mm前後
118	2011/03/27	03:16	3	1,225	50kg	カメラ停止
128	2011/04/01	09:36	3	59	0.2kg	φ5mm以下
130	2011/04/01	13:15	3	454	5kg	φ5～10mm
		注 推定衝突位置は全てSP4である				

・ 速度型振動計を使用した崩落検知システムで最も規模の大きかった落石は、3 月 7 日の 14 時 01 分と 3 月 27 日の 3 時 16 分に検知した振動であった。推定質量はいずれも 50kg 前後と推定される。
・ 3 月 7 日 14 時 01 分の落石は、監視カメラの映像によると SP4 の鋼製横矢板を変形させるほどの規模であった。
・ 3 月 27 日の 3 時 16 分の落石については、監視カメラが停電のため機能を停止していたことから衝突時の状況は不明であるが、3 月 7 日の衝突を考えると、鋼製横矢板に対してかなりのダメージを与えている可能性がある。

④ 長期検証実験のまとめ

速度型崩落検知システムに内蔵されている波形パラメーター自動抽出機能により、振動の検出時刻、検出 ch、各 ch の最大振幅、検出 ch の卓越周波数と継続時間、波形種別（落石、発破、自動車等）を自動的に抽出した。

上記の各パラメーターの中から最大振幅と継続時間から「振動の疑似振動エネルギー」を計算し、1 時間ごとの経時グラフを作成した。

事前基礎実験（振り子方式衝撃実験）から算出した「衝撃位置－平均速度振幅比」のグラフを使用して、落石が衝突した鋼製横矢板を推定した。

事前基礎実験（振り子方式衝撃実験）から算出した SP4 での「鉄球質量－平均速度振幅」のグラフを使用して、落石の質量を推定してみた。

速度型崩落検知システムによる長期検証実験結果を、以下のようにまとめた。

（ⅰ）落石の周波数特性

- 200Hz 以上 300Hz 未満の卓越周波数の比率が 85%以上であることが判明した。
- 崩落検知センサーとして採用する周波数帯を、200Hz～400Hz ないしは 200Hz～500Hz に限定できる可能性がある。

（ⅱ）落石の振幅特性

- 各落石振動の最大振幅値をまとめると，もっとも小さな最大振幅値は約 4mKine であり、最も大きな最大振幅値は約 1,420mKine（1.4Kine）であった。 なお、累積頻度の中央値は約 60mKine であった。 注 最大振幅値とは、1 つの落石振動波形（1 イベント）の中で最も振幅の大きい値のことであり、ピーク値と呼ぶこともある。
- 最大振幅値と継続時間の積を「振動エネルギー」と定義づけたが、振動エネルギーの値で 20～4,000 の間はほぼ直線的な関係となっており、落石の発生予測に利用できる可能性がある。

（ⅲ）落石イベント及び振動エネルギーの時間変化

- 1 時間ごとのイベント発生数を使用した時間別頻度グラフは、振動の検知数のみが反映され落石の規模そのものは含まれていない。
- 最大振幅×継続時間から計算する振動エネルギーを使用した時間別グラフは、イベント数ではなく、1 時間ごとに積算した振動エネルギーの値をグラフ化するものであるため「落石の規模」をある程度反映することができる。
- 振動エネルギーのグラフより、検証実験期間中、3 月 7 日と 3 月 27 日に最も大きな落石が発生し、次ぐ規模の落石は 12 月 27 日に発生したことが判明した。

（ⅳ）落石の推定衝突位置

- 監視カメラによる検証結果から、落石の推定位置精度は 1 スパンの誤差を許すならば 90%以上であり、位置の推定精度は極めて高いと評価できる。
- ただし、精度と平均振幅値には明瞭な相関があり、精度良く位置を推定するためにはある程

度以上の落石の規模（大きさ：質量）が必要であることが判明した。

- この推定技術は仮設防護柵のように検知センサーを一列に配置するケースのみならず、洞門や待ち受け工のような構造体の天盤部分に平面状に設置する場合にも適用可能である。

（v）落石の推定質量（参考）

- 速度型崩落検知システムで検出した最も規模の大きかった落石は、3 月 7 日の 14 時 01 分と 3 月 27 日の 3 時 16 分に検知した振動であった。 落石の質量はいずれも 50kg 前後と推定される。
- 3 月 7 日 14 時 01 分の落石は、監視カメラの映像によると SP4 の鋼製横矢板を変形させるほどの規模であった。
- 落石の質量を推定するにあたっては、衝突速度、密度と反発係数などを考慮していないため、今後推定精度を高める研究が必要であろう。

（vi）その他（検知システムの故障対応）

本検知システムは、定時チェックの結果や振動検出の結果を e-mail で送信する通信機能があり、管理パソコンでそれを受信することによって故障を知ることができる。しかし、長期検証実験を行った足尾地区では、固定電話網と携帯電話網共に不通であったため、実験終了まで故障の有無を知ることは不可能であった。検知システムが故障した場合には、早期確認と復旧が重要であるため、実際に検知システムを設置するに当たっては通信環境を整備することも重要であると考える。通信環境が整備されていない場所では、監視員を巡回させて検知システムの動作状況を確認するシステム等を検討する必要がある。

(2) 加速度型崩落検知システム（仮設防護柵への落石・小崩落の発生のみを検知するシステム）

加速度型崩落検知システムの長期検証実験については、次の順序で結果報告する。

① 平成 22 年 12 月 8 日～平成 23 年 1 月 12 日の測定データに基づく検証実験結果
② 平成 23 年 1 月 12 日までの実験結果を踏まえた追加基礎実験について
③ 平成 23 年 2 月 21 日以降の測定データに基づく検証実験結果

① 平成 22 年 12 月 8 日～平成 23 年 1 月 12 日の測定データに基づく検証実験結果

(ⅰ)期間中の判定レベル値設定

前半の長期検証実験期間では、加速度型崩落検知システムの判定レベル値である振幅レベルを**0.1G** と設定した。これは、振幅レベル設定範囲は加速度センサーの仕様（測定範囲±4G、最小分解能 0.05G）を踏まえ、微小ノイズの影響を考慮して最小分解能の 2 倍の値としたものである。なお、振幅レベル超過回数は空電ノイズを考慮して 2 回以上とした。また、フィルタリングの周波数帯域は、衝撃実験で得られた卓越周波数帯域 200～500H z とした。

(ⅱ)崩落検知センサーの検知結果による期間中のイベント発生状況

加速度型崩落検知システムの検知結果による期間中のイベント状況を図 4.51 に示す。図には、比較的崩落規模が大きいイベント（落石最大直径φ20cm 以上、あるいは測定上限値以上）を表示した。

- 期間中の検知イベント回数は合計 35 回であり、最も日イベント回数が多いのは日雨量が 50mm を超えた 12 月 22 日（10 回）であった。一方、12 月 21、22 日以外は降雨があった日に落石はない。
- 期間中に落石の可能性のある規模の地震（震度 3 以上：棚の食器類が音を立てる場合あり）は発生していないことから、多くの落石は地震や降雨以外に起因する可能性がある。
- 期間中 2 回あった比較的大きな落石・小崩落の発生前には、イベント回数が急増するといった、崩落の前兆のような現象は認められなかった。
  ※図中 12/22 0:34 の直前のイベントは、12/21 19:38 のみ（表 4.10 参照）。

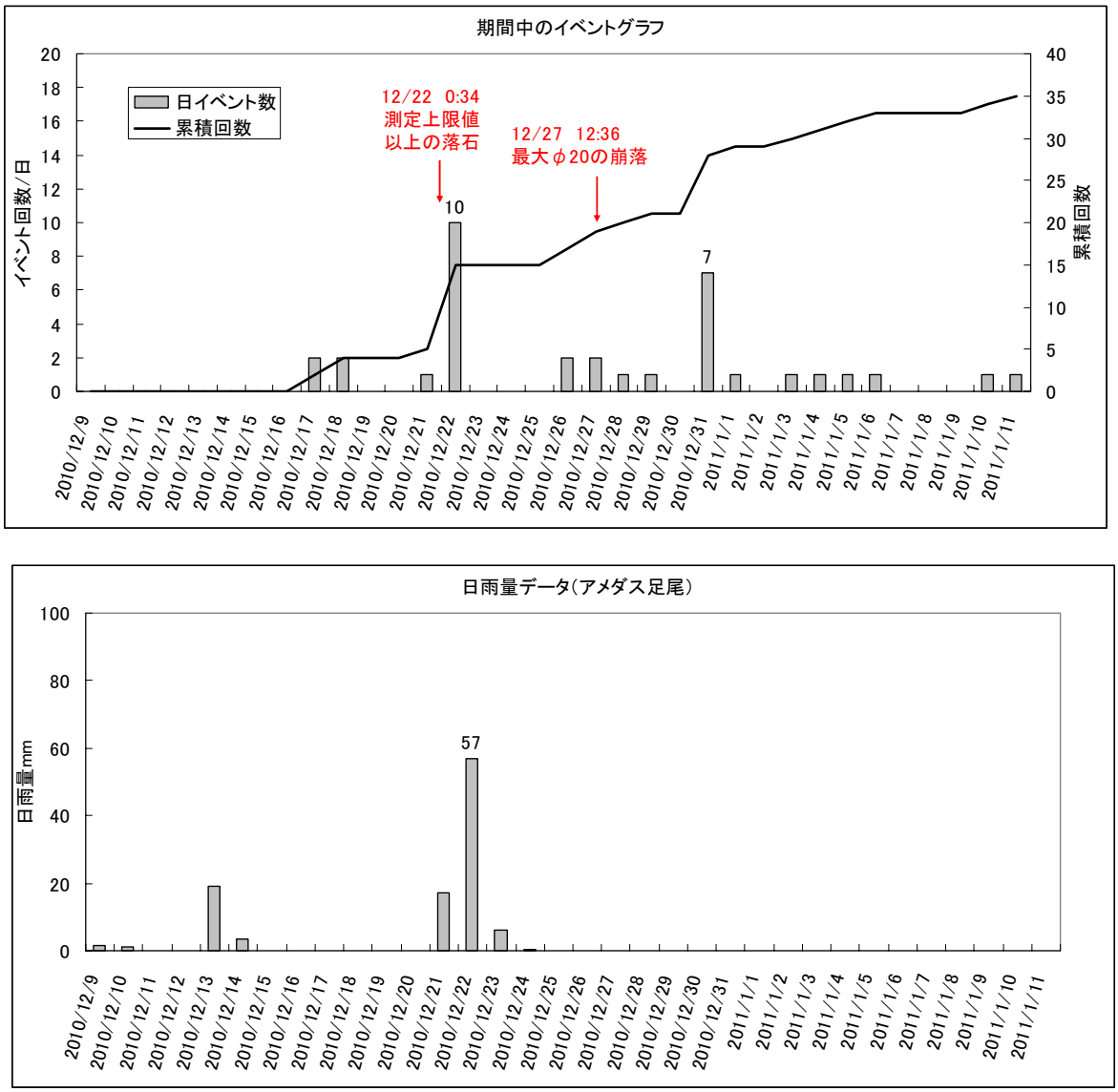


図 4.51 期間中の検知イベント状況と降雨状況

最も日回数が多かった 12 月 22 日の検知結果を図 4.52 に示す。同日のアメダスデータを併載した。

・ 降雨期間中イベントはほとんど発生しておらず、降雨終了してから 5 時間以上が通過して落石等が発生している。このことから、12 月 22 日のイベント発生に降雨が直接寄与した可能性は低いと考える。

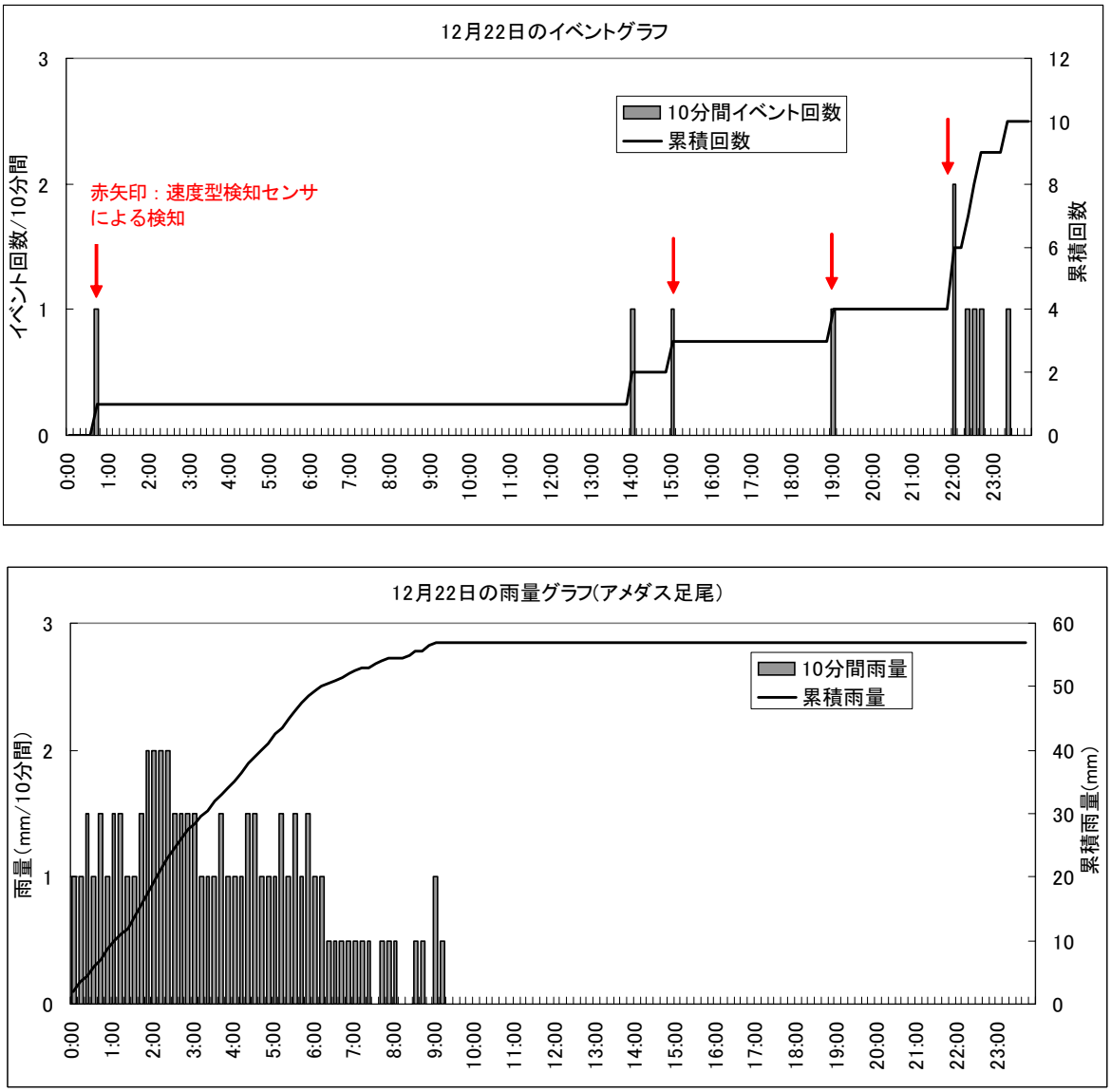


図 4.52　検知イベント数が最も多かった 12 月 22 日の検知イベント状況と降雨状況

（iii）崩落検知システムの検証結果

崩落検知システムの検知結果と検証用振動計や監視カメラのデータ解析結果を踏まえた取りまとめ一覧を表 4.10 に示す。その中で着色した部分（23 イベント）が監視カメラおよび検証用振動計の波形データによる検証結果により落石・小崩落が確認されたイベントである。それ以外のイベントは、照明装置の不具合や振動計の設定不良により落石かどうかの確認ができていない。ただし、同時間帯は速度型崩落検知システムでも落石を検知していないので、落石以外の振動に起因する可能性がある。

- 監視カメラの画像データにより確認した結果、検知センサーは概ねφ5cm 以下の衝撃エネルギーの小さい落石が検知できている。
- 一方、表 4.11 に示すとおり、同一期間の速度型崩落検知システムによる検知イベント 49 回のうち、加速度型崩落検知システムが検知できなかったイベントは 30 回程度あった。ここで検知できなかった各イベントの速度型崩落検知システムによる最大速度振幅は概ね 100mkine（0.1G＝0.98m/sec^2）以下であった。

表 4.10　崩落検知システムによる検知イベント時の監視カメラ状況、検証用振動計による測定結果（2010/12/8～2011/1/12）

検知センサイベント検知時間	崩落検知センサ検知		監視カメラによる確認状況							検証用振動計による最大加速度振幅（m/s²）				速度型振動計による検知状況
	イベント数	累積回数	カメラ画像	カメラ音声	落石タイプ	最初の打撃スパン	打撃スパン	落石個数	備考（直径φはセンチ）	トリガー時刻	振動計1	振動計2	振動計3	
2010/12/17 11:30～40	1	1	○	○	複数	5	4、5	2	φ5以下	11:39	6.4	20.1	53.1	○
2010/12/17 12:30～40	1	2	○	○	単発	4	4	1	φ5以下	12:38	9.3	26.9	49.7	○
2010/12/18 10:20～30	1	3	○	○	複数	4	3、4	1	大半は到達せず	10:25	11.8	42.0	54.4	○
2010/12/18 15:10～20	1	4	×	○?	単発？	？	？	1？	カチン音	15:18	1.6	5.2	1.4	
2010/12/21 19:30～40	1	5	×	○	複数	？	？	2	φ5以下	19:38	18.6	56.3	38.4	○
2010/12/22 0:30～40	1	6	×	○	複数	？	？	5以上	φ5以下	0:34	550.0	314.5	105.8	○
2010/12/22 13:50～14:00	1	7	×	×	？	？	？	？	曇り、強風	13:54:(カメラ)				
2010/12/22 14:50～15:00	1	8	○	○		5？	5？	2	φ5以下	14:58	2.9	5.8	29.9	○
2010/12/22 18:50～19:00	1	9	×	○	単発	？	？	1	φ5以下	18:55	28.3	65.3	26.5	○
2010/12/22 21:50～22:00	1	10	×	×	？	？	？	？	強風	21:56(カメラ)				
			×	×	？	？	？	？	強風	21:59(カメラ)				
2010/12/22 22:10～22:20	1	11	×	×	？	？	？	？	強風	22:14(カメラ)				
2010/12/22 22:20～22:30	1	12	×	×	？	？	？	？	強風	22:21(カメラ)				
2010/12/22 22:30～22:40	1	13	×	×	？	？	？	？	強風	22:32(カメラ)				
2010/12/22 23:20～23:30	1	14	×	×	？	？	？	？	強風	23:19(カメラ)				
2010/12/26 13:10～13:20	1	15	○	○	複数	2or3	2,3	4以上	φ5以下	13:11	174.2	97.8	43.5	○
2010/12/26 13:40～13:50	1	16	○	○	単発	1	1	1	Φ10cm以上	13:41	356.8	131.9	91.0	○
2010/12/27 12:20～12:30	1	17	○	○	複数	5	全体	10以上	規模大きい	12:30	47.2	143.0	216.8	○
2010/12/27 12:30～12:40	1	18	○	○	複数	5	3～5	10以上	Φ20cm以上、規模大きい	12:36	65.5	248.4	550.0	○
2010/12/28 16:50～17:00	1	19	×	○	複数	？	全体？	2以上	φ5以下	16:54	16.9	44.9	197.8	○
2010/12/29 2:50～3:00	1	20	×	×	？	？	？	？	強風	2:51(カメラ)				
2010/12/31 12:10～12:20	1	21	×	○	単発	？	？	1	φ5以下	12:12	10.6	35.3	22.5	○
2010/12/31 15:30～15:40	1	22	○	○	単発	5	3～5	1	大半は到達せず	15:31	7.4	21.1	111.2	
2010/12/31 20:40～20:50	1	23	×	×	？	？	？	？	強風、雪？	20:47(カメラ)				
2010/12/31 20:50～21:00	1	24	×	×	？	？	？	？	強風、雪？	21:00(カメラ)				
2010/12/31 21:10～21:20	1	25	×	×	？	？	？	？	強風、雪？	21:15(カメラ)				
2010/12/31 22:10～22:20	1	26	○	○	単発	3	3	1	φ5以下	22:13	8.4	50.8	164.2	○
2010/12/31 23:50～0:00	1	27	×	×	？	？	？	？		23:50	3.1	4.7	5.7	
2011/1/1 10:10～10:20	1	28	○	○	単発	4	4	1	φ5以下	10:20	20.9	57.9	78.8	○
2011/1/3 11:30～11:40	1	29	○	○	単発	5	5	1	φ5以下	11:34	10.7	14.5	144.2	○
2011/1/3 17:30～17:40	1	30	×	○	複数	？	？	2以上	φ5以下	17:34	10.4	41.4	46.4	○
2011/1/4 13:10～13:10	1	31	○	○	単発	3	3	1	φ5以下	13:05	17.5	57.5	41.5	○
2011/1/5 15:40～15:50	1	32	○	○	単発	4	3、4	1	跳ね返り重複打撃、未到達あり	15:45	113.9	415.4	388.4	○
2011/1/6 12:50～13:00	1	33	○	○	単発	5	5	1	φ5以下	12:58	6.9	16.1	100.7	
2011/1/10 10:30～10:40	1	34	○	○	複数	1	1	2以上	φ5以下	10:35	12.5	7.2	3.4	
2011/1/11 12:50～13:00	1	35	○	○	単発	5	4、5	1	未到達あり	12:52	10.4	24.8	181.1	

黄色：監視カメラおよび検証用振動計の波形データによる検証結果により落石・小崩落が確認されたイベント、ピンク：振動計の上限値以上を超過
右端欄の速度型振動計による検知状況：速度型振動計を用いた崩落検知システムでの検知状況

表 4.11　速度型崩落検知システムによる測定結果（2010 年 12 月 10 日～2011 年 1 月 6 日）

※検出日時が青色の部分は、加速度型崩落検知システム（監視カメラ）で確認できた崩落

No.	検出日時		ﾄﾘｶﾞ CH	継続時間 sec	周波数 Hz	最大 CH	ch1 mKine	ch2 mKine	ch3 mKine	ch4 mKine
1	2010/12/10	09:05	1	3.66	51	1	49	27	27	6
2	2010/12/11	13:12	3	3.68	51	3	14	60	61	11
3	2010/12/12	00:51	4	0.17	94	4	48	72	96	551
4	2010/12/12	00:51	2	3.66	50	2	42	78	47	8
5	2010/12/13	10:58	4	0.85	50	4	8	18	27	90
6	2010/12/13	13:37	3	3.64	50	3	7	31	52	6
7	2010/12/16	11:25	2	3.67	50	3	7	54	61	6
8	2010/12/17	11:39	3	3.57	50	3	8	134	517	7
9	2010/12/17	12:37	2	3.66	206	2	8	144	131	7
10	2010/12/18	10:24	3	3.58	57	2	10	464	463	57
11	2010/12/19	10:13	4	0.20	50	4	11	23	35	150
12	2010/12/20	12:41	2	3.67	50	2	8	55	43	6
13	2010/12/21	19:38	2	0.65	50	2	10	388	182	13
14	2010/12/22	00:34	3	2.90	49	2	69	1,617	901	50
15	2010/12/22	00:34	4	1.38	50	2	5	212	210	188
16	2010/12/22	14:58	3	3.66	51	3	5	24	101	4
17	2010/12/22	18:51	4	0.06	129	4	6	332	91	1,253
18	2010/12/22	21:43	2	1.39	47	2	6	368	164	6
19	2010/12/24	09:36	3	3.67	50	3	5	31	122	4
20	2010/12/25	10:27	3	3.66	50	3	8	57	59	6
21	2010/12/25	10:58	3	3.66	50	3	8	49	82	6
22	2010/12/26	11:06	2	3.67	50	2	10	110	44	9
23	2010/12/26	12:01	2	3.67	50	2	10	112	74	13
24	2010/12/26	13:11	2	3.63	27	2	19	332	187	14
25	2010/12/26	13:41	2	1.60	26	1	2,101	2,101	1,320	44
26	2010/12/27	11:57	2	3.63	50	2	11	73	52	19
27	2010/12/27	12:30	3	3.28	24	3	12	1,054	1,074	21
28	2010/12/27	12:36	3	3.11	84	3	17	2,101	2,101	20
29	2010/12/27	13:46	3	3.66	50	3	11	47	75	38
30	2010/12/27	13:48	2	3.66	50	2	12	175	78	9
31	2010/12/28	16:25	2	3.67	50	2	12	64	44	15
32	2010/12/28	16:53	4	0.39	50	3	13	217	573	173
33	2010/12/29	03:35	1	3.58	86	1	166	96	54	12
34	2010/12/29	06:09	2	3.66	50	2	35	127	53	9
35	2010/12/29	12:23	2	3.67	50	2	12	79	52	10
36	2010/12/31	12:12	2	3.58	50	2	14	331	146	19
37	2010/12/31	12:39	4	0.01	50	4	13	130	105	243
38	2010/12/31	13:28	3	3.67	51	3	14	55	106	12
39	2010/12/31	21:24	3	3.60	50	3	14	65	99	19
40	2010/12/31	21:50	2	3.63	50	2	14	206	88	12
41	2010/12/31	22:13	2	3.62	6	3	13	279	726	18
42	2010/12/31	23:33	3	3.61	50	2	13	91	59	10
43	2011/1/1	04:12	3	3.61	50	3	14	60	105	11
44	2011/1/1	10:19	3	4.06	182	3	16	595	1,078	13
45	2011/1/3	11:34	3	3.67	50	3	14	163	424	12
46	2011/1/3	17:34	3	3.66	51	3	13	206	261	10
47	2011/1/4	13:05	3	3.67	50	2	15	349	163	12
48	2011/1/5	15:44	3	1.85	52	2	19	1,363	1,296	13
49	2011/1/6	01:55	2	2.95	50	2	13	228	131	10

＜まとめ＞

- 期間中に発生した落石・小崩落イベントのうち、地震や降雨に起因したイベントは認められなかった。また、比較的規模の大きな崩落の前兆も確認できなかった。
- 照明装置の不具合や振動計の設定不良により落石かどうかの確認ができていない検知結果があった。この点は、監視カメラや検証用振動計の稼動に万全に期し、改めて検証する必要がある。
- 監視カメラデータを踏まえると、加速度型崩落検知システムは比較的衝撃エネルギーの小さい落石が検知できているが、別途実施した速度型崩落検知システムの結果を踏まえると、必ずしも確実ではない。
- 小さい衝撃エネルギーの落石が検知できない場合、小崩落を伴う大崩落の予兆現象を正確に把握できない可能性がある。したがって、加速度型崩落検知システムの振幅しきい値を見直す必要がある。

② 平成 23 年 1 月 12 日までの実験結果を踏まえた追加基礎実験について

前述したように、加速度型崩落検知システムの落石判定レベルである振幅レベル値の設定が高かったため、衝撃エネルギーの小さな落石を確実に捉えられなかった。このことから、振幅レベル値を設定下限値の 0.05Gに設定し、確実に捉えられるかを検証することとした。しかし、下限値に設定することで、一つの検知センサーが受け持つ検知範囲が狭くなり、計器設置コストが高くなることが想定される。この点を予め確認するために、仮設防護柵に対して以下の追加基礎実験を行った。

- 小さな衝撃エネルギーによる振り子方式衝撃実験
- 最大スパン（5 スパン）での崩落検知システムの性能確認実験

（ⅰ）小さな衝撃エネルギーによる振り子方式衝撃実験＞

小さい衝撃エネルギーの落石を想定した鉄球振り子による衝撃実験を実施した。実験条件を図 4.53、4.54 に示す。実験方法は、従来の振り子方式衝撃実験と同じであり、用いた鉄球が 1kg で、落下高さを 10cm とした。この方法による衝撃エネルギー（約 1J）は、φ5cm の石が数 10cm 程度の高さから転げ落ちた程度である。衝撃位置と検証用振動計（加速度型）の設置距離に応じた最大振幅の変化（距離減衰）について調べた（図 4.55）。

図には、事前基礎実験データ（図中 1kg 以外のデータで、鉄球質量が 1、2、4kg の 3 通り、衝撃高さが 1 段目、2 段目、3 段目の 3 通り、落下高さが 50cm の合計 9 データ）も併記した。

- 実験の結果、各衝撃位置による違いはあるが、これまでの結果の半分から 5 分の 1 程度の振幅になることが分かった。
- 最大振幅は 3 スパン以上離れると 10～20m/sec^2 の値となった。
- 検知センサーの振幅レベルの設定下限値 0.05G＝0.49m/sec^2 であることから、3 スパン以上離れても検知は可能であると考える。

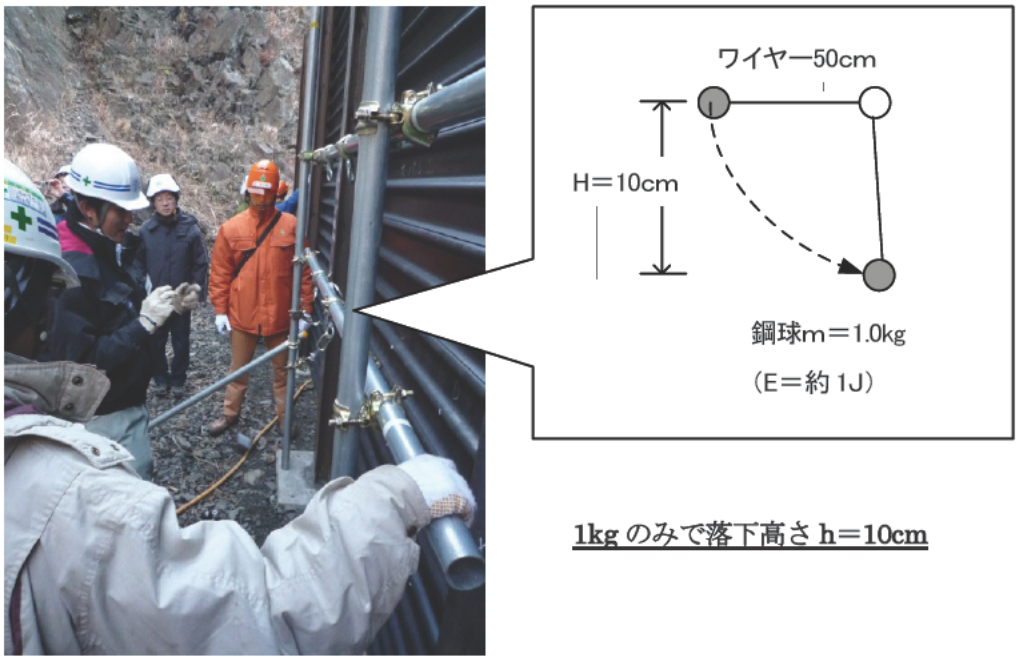


図 4.53　小さな衝撃エネルギーによる振り子方式衝撃実験の概要

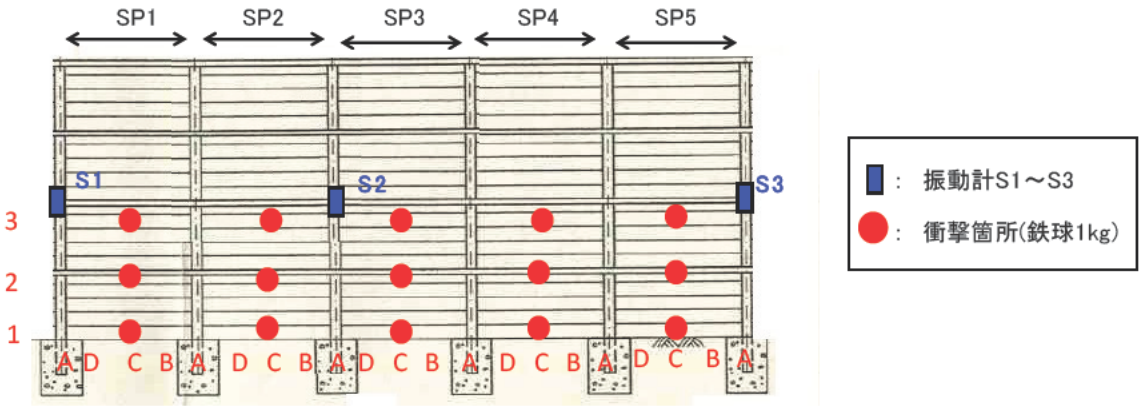
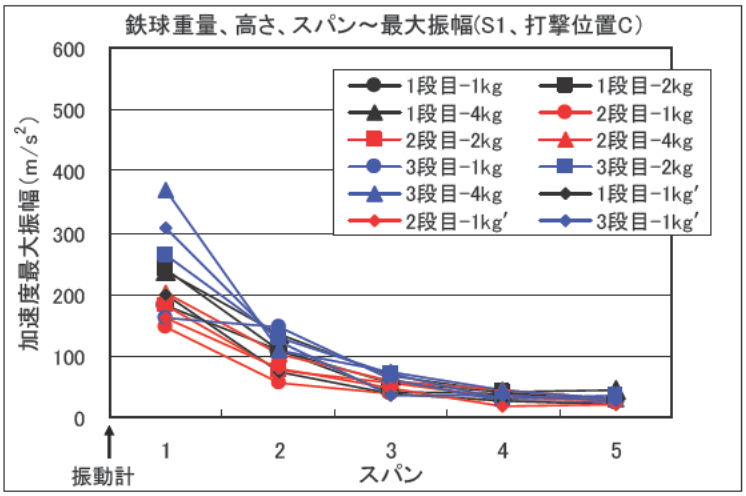
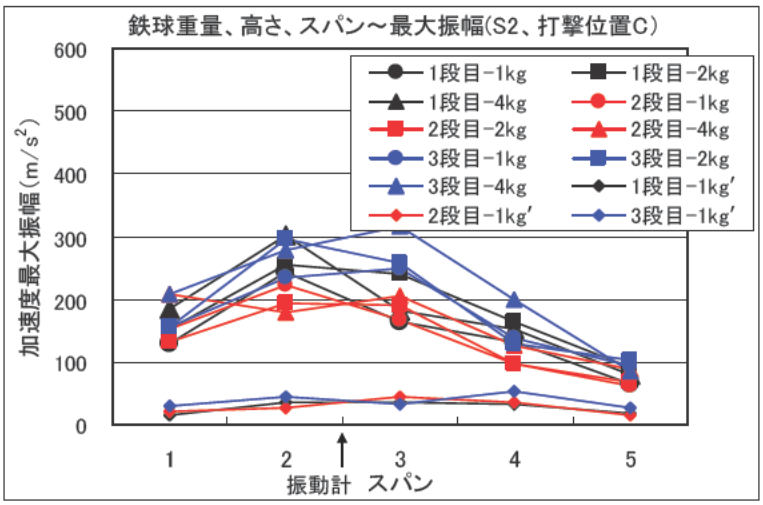


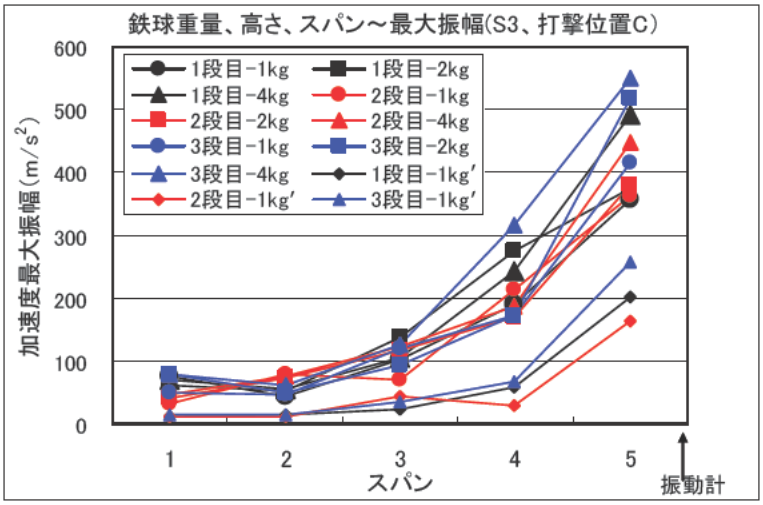
図 4.54　振り子による衝撃位置



振動計 S1



振動計 S2



振動計 S3

図 4.55　小さな衝撃エネルギーによる衝撃位置に応じた最大振幅の変化
（1kg′ 以外の 9 データは事前基礎実験による）

（ⅱ）最大スパン（5 スパン）での崩落検知システムの性能確認実験

図 4.56 に示すとおり、崩落検知システムの検知センサー（ユニット）を 5 スパン（10m）離して 2 台設置し、鉄球 1kg を 10cm の高さから落下して小さい衝撃エネルギーの場合の検知の可能性を確認した。

検証の結果、図 4.57 に示すとおり検知範囲にバラツキはあるが、5 スパンの場合の検知漏れはないことが確認された。また、センサーの同時検知の発生は無かった。

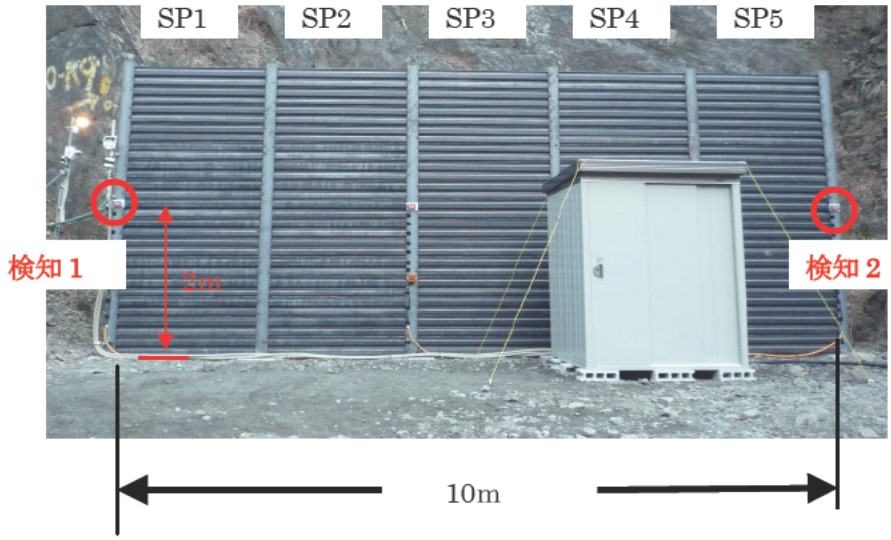


図 4.56　崩落検知システムの検知センサーの配置図

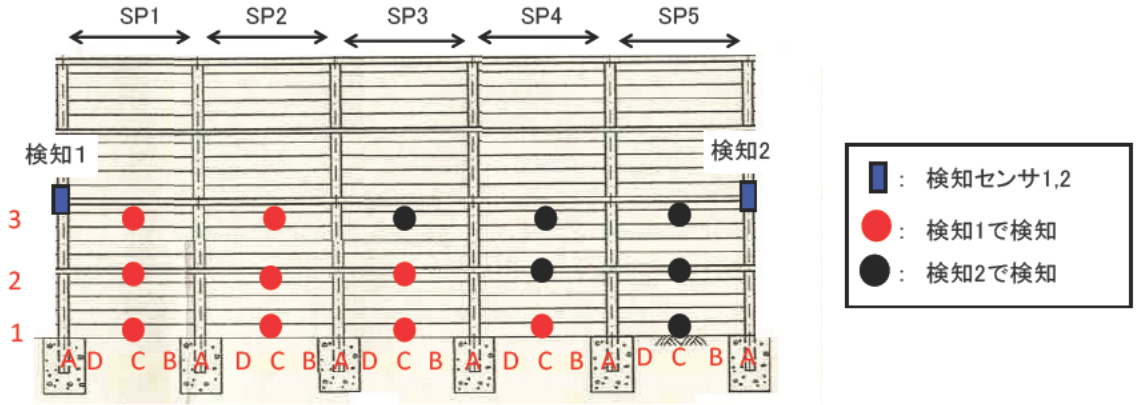


図 4.57　小さな衝撃エネルギーによる衝撃時の検知センサーの性能確認実験結果

（ⅲ）まとめ

・ 加速度型崩落検知システムの落石判定レベルである振幅レベル値を設定下限値 0.05G に設定し、衝撃エネルギーが小さい落石を想定した一連の追加実験を行った結果、φ5cm の石が数

10cm 程度の高さから転げ落ちた程度の衝撃エネルギーであっても、本崩落検知システムは十分検知できることが確認できた。

- 上記の同条件で検知センサーの設置間隔を 10m（5 スパン）に広げても、検知漏れは無かった。

③ 平成 23 年 2 月 21 日以降の測定データに基づく検証実験結果

（ｉ）期間中の落石判定レベル設定

後半の長期検証実験期間では、②の追加実験の成果を踏まえ、設定下限値である 0.05G と設定した。振幅レベル超過回数や、フィルタリングの周波数帯域は、これまで同様の値とした。

（ii）一連のシステムの稼動状況

一連のシステム（崩落検知システム、監視カメラ、検証用振動計）を再稼動させた 2 月 22 日から、東北地方太平洋沖地震の影響により計画停電（3 グループ）が実施された 3 月 16 日 18 時前まで連続データを得られた。

3 月 16 日からデータ回収日の 3 月 28 日までは、検証用振動計は計画停電期間を除きデータ取得ができたが、計画停電で一端停止した監視カメラは再起動できなかったので、その間の画像データは取れなかった。4 月 19 日は電源装置の故障により監視カメラおよび検証用振動計（加速度型）が稼動しなかった。

（iii）崩落検知システムの検知結果による期間中のイベント発生状況

2 月 22 日～4 月 19 日のデータのうち、崩落検知システム、監視カメラ、検証用振動計が全て稼動した場合のデータを用いて、検証を行った。

崩落検知システムの検知状況について、10 分間毎のイベント回数（1 イベントは 1 回検知した後 10 秒間の不感知とする）とその累積回数を図 4.58 のとおり整理した。

- イベント回数が期間中で累積 6,000 回を超える結果となった。個別検知データと監視カメラ画像データおよび検証用振動計の波形データを照合した結果、大半が 2010 年 12 月末～2011 年 4 月初旬に工事区域で行われた法面対策工事に使用した建設機械（バケット型掘削機、工事用モノレールなど）の振動であることが確認された。
- また、降雨時の雨だれの振動（検知センサー近くに設置した監視カメラから落ちる水滴の影響の可能性）も検知されることが確認された。

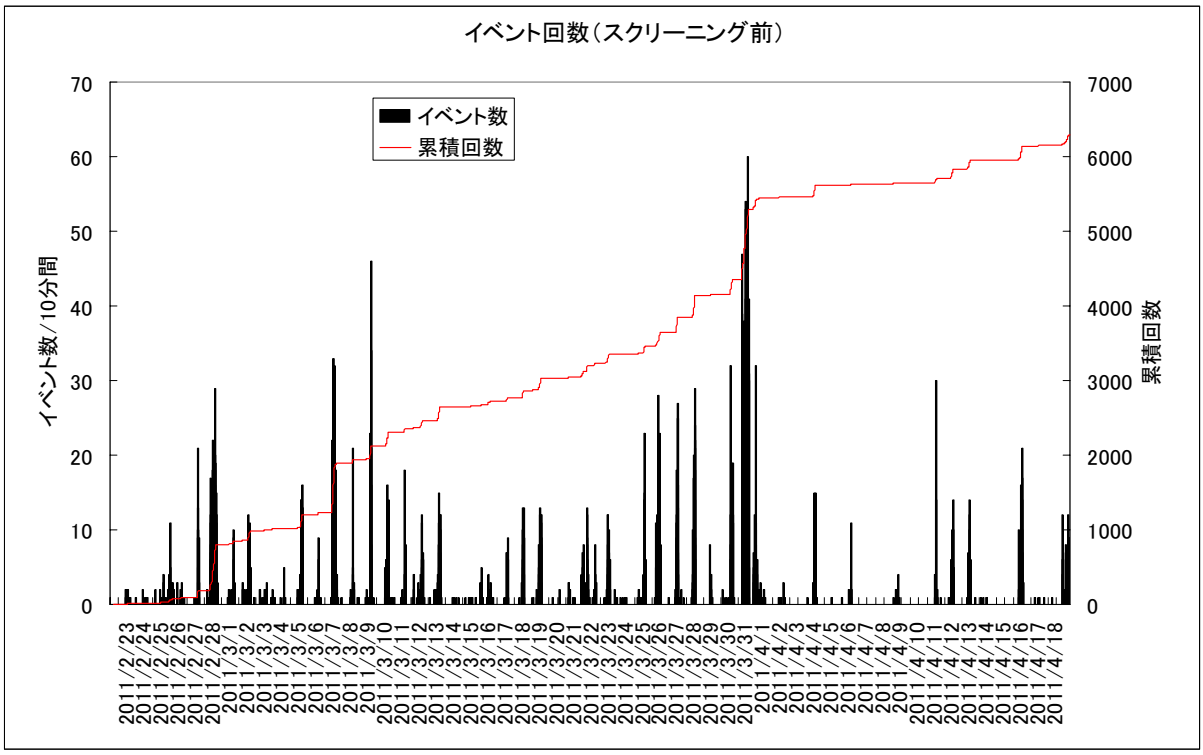


図 4.58　崩落検知システムによるイベント回数の経時変化グラフ（スクリーニング前）

(iv)落石発生状況について

崩落検知システムの検知データを監視カメラの画像および音声データや検証用振動計の波形データにより、落石かどうかを識別した（スクリーニング）。スクリーニング後の経時変化グラフを図 4.59 に示す。その結果期間中のイベント数は 200 回程度となった。図には、比較的崩落規模が大きいイベント（落石最大直径φ20cm 以上、あるいは測定上限値 550m/sec^2 以上）を矢印で示した。なお、スクリーニング結果に基づく識別結果を巻末一覧表にまとめた。

- 最も日イベント回数が多いのは強風があった 2 月 25 日（29 回）であった。これは、強風による直接的な影響ではなく、飛び石の影響と推察する。
- 長期検証実験中、最も大きい落石・小崩落は 3 月 7 日の 2 回のイベント（14:31、15:12）であった。φ20～30cm の落石（最大φ50cm）が多数発生し、落石の直撃により防護柵下端の横矢板が変形した。ただし、このイベント発生の前には、落石の急増といった崩壊の前兆現象は確認できなかった。
- その他、期間中に発生した落石・小崩落イベントのうち、3 月 11 日に発生した東北地方太平洋地震を除き、地震や降雨に起因したイベントは認められなかった。

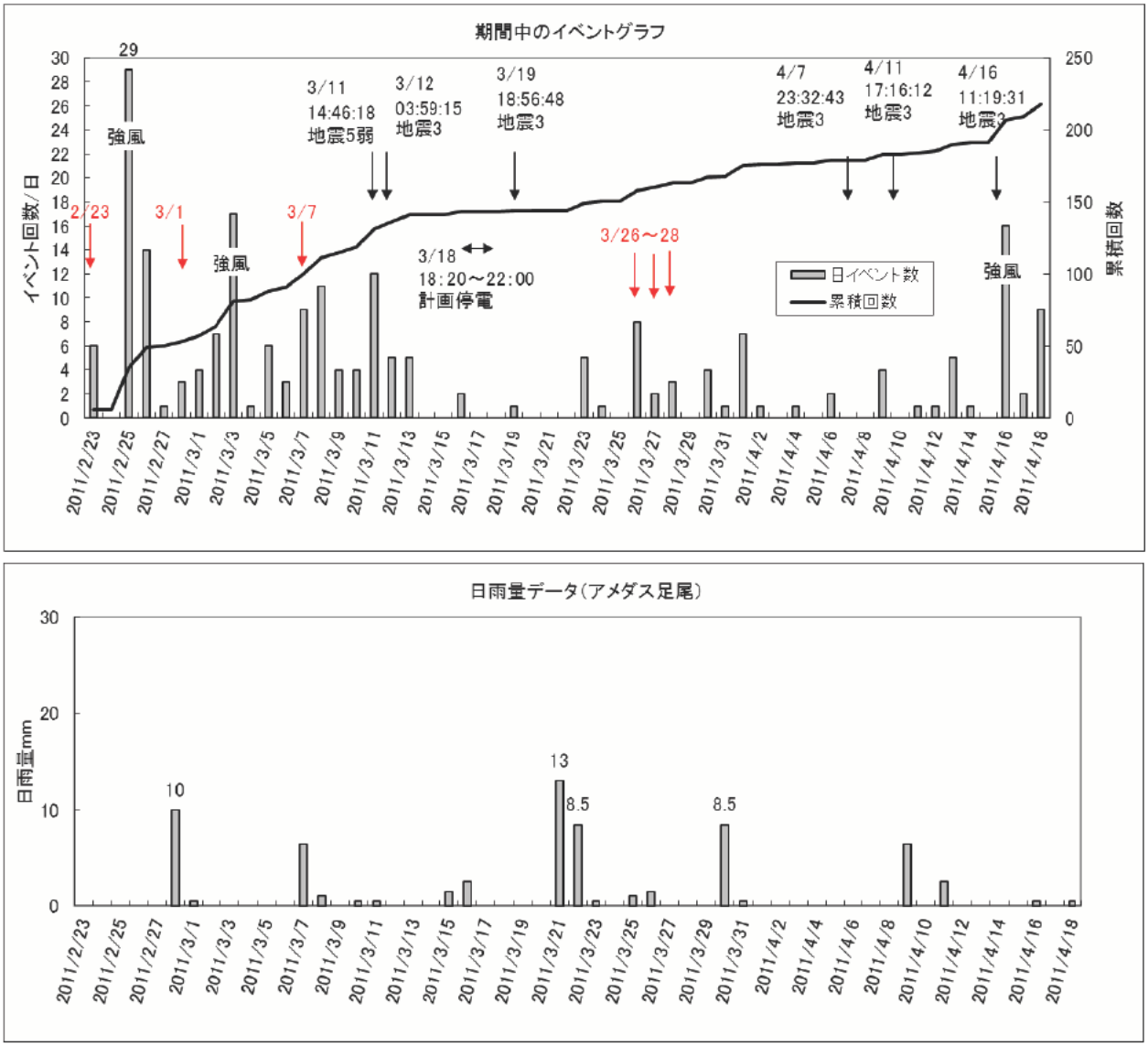


図 4.59　期間中の検知イベント状況と降雨状況

写真 4.5 に 3 月 7 日 14:31 の監視カメラによる落石状況の画像データを示す。また、写真 4.6 に現地で確認した仮設防護柵の変形状況を示す。このイベント発生の前には、図 4.59 に示すとおり、落石の急増といったような崩壊の前兆現象は確認できなかった。

なお、東北地方太平洋沖地震（現地の震度５弱）時は、監視カメラにより約３分間の揺れの間、断続的にφ10～20cm の落石が発生したことが確認された。

時刻 14:30:41

時刻 14:30:42

（赤枠は検知センサーの検知信号により表示）

時刻 14:30:43

時刻 14:30:44

時刻 14:30:45

写真 4.5　3 月 7 日 14:31 頃の監視カメラによる落石状況

斜面側の変形状況（落石直撃部分）

斜面裏側の変形状況（最大で 2cm 程度の裏側に曲がっている）

写真 4.6　現地確認による仮設防護柵下端の変形状況
（3 月 7 日 14 時 31 分頃の落石直撃による）

（ｖ）崩落検知システムの検証結果

スクリーニング結果を踏まえ、崩落検知システムの信頼性等について考察した。

- 崩落検知システムの落石判定レベルである振幅レベル値を 0.05G に設定することによって、φ5cm 以下の比較的衝撃エネルギーの小さい落石が捉えられた。
- また、監視カメラ画像の結果から、最大スパン長 10mの中央（スパン 3）に落下したφ5cm の落石も検知できることが確認できた。追加実験を踏まえて延長 10mの仮設防護柵両側に設置した 2 台の検知センサーによって、10m内の小さい落石を検知できたと考える。
- 以上の一連の検証結果により、落石に対する検知漏れはないと考える。
- しかし、スクリーニング前のデータを見ると、振幅レベル値が 0.05G の場合、雨だれといった落石以外の微小ノイズを検知することが確認された。雨だれのような小さいノイズの除去は、10bit 程度の分解能の当該システムでは難しい。
- 写真 4.7 に仮設防護柵周辺の工事状況を示す。図 4. 61 に工事振動と代表的な落石時の応答スペクトルを示す。バケット型掘削機の走行や掘削に伴う振動、工事用モノレールのエンジンや走行に伴う振動の卓越周波数は落石衝撃による仮設防護柵の振動と同じ卓越周波数帯域（200～250Hz 付近）にみられる。このことから、工事に伴う振動は、崩落検知システムでは落石と分離ができない。工事振動が頻発する区域での振幅レベル値の設定には、想定する落石の大きさ、衝撃エネルギーとともに、工事振動の影響を予め考慮する必要がある。

写真 4.7　仮設防護柵周辺の工事状況（2011 年 2 月 23 日の状況））

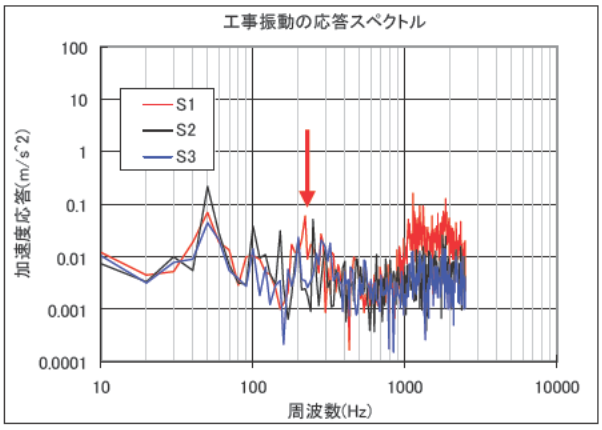
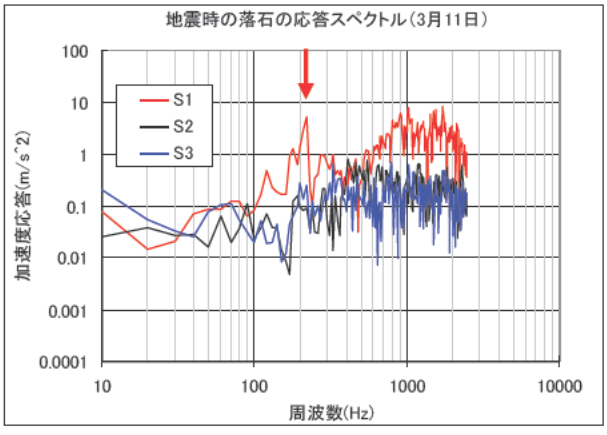
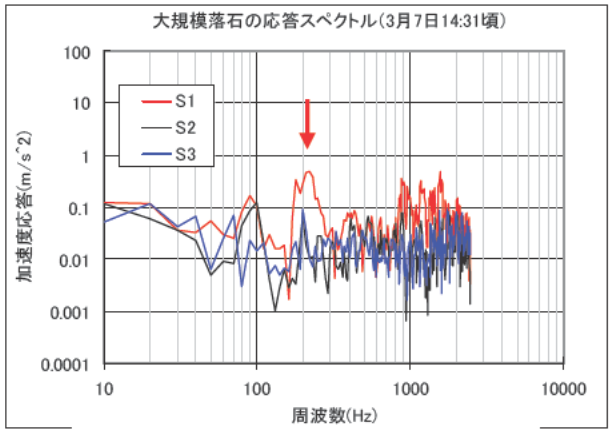


写真 4.7 と同日の工事振動（モノレールと重機）



3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震



3 月 7 日 14:31 頃の落石

図 4.61　検証用の加速度型振動計による代表的な振動源の加速度応答スペクトル

・ 12 月～4 月の検証期間中は、現地では氷点下の日が続き、検知センサーの電池電源には過酷な環境であったこと、また、検知回数も数千回を数えたことから、電池の消耗が激しいことが想定された。しかし、検知センサーの電池（単三 1.5V×3 本）や中継ユニットの電池（単一 1.5V×2 本）は、観測期間中に切れることは無かった。これは、電源制御のための微振動センサーを使用したことが有効であったと考える。また、検知センサーのポリカーボネート製ケースに外観上損傷は無く、内部への水の浸入も無かった。（写真 4.8）

以上のことから、検知センサーは安定性や耐久性の面では実用化レベルに達していると考える。

写真 4.8　長期検証実験後の検知センサーの外観確認
（ポリカーボネードのケースにはひび割れやゆがみは認められない）

④ 長期検証実験のまとめ

＜落石の発生傾向、予兆など＞

- 長期検証実験中、最も大きい落石・小崩落は 3 月 7 日の 2 回のイベント（14:31、15:12）であった。φ20～30cm（最大φ50cm）の落石が多数発生し、落石の直撃により防護柵の横矢板が変形した。ただし、このイベント発生の前には、落石の急増というような崩壊の前兆は確認できなかった。
- その他、期間中に発生した落石・小崩落イベントのうち、3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震を除き、地震や降雨に起因したものは認められなかった。

＜検知センサーの性能、信頼性など＞

- 崩落検知センサーの振幅レベルのしきい値を 0.05Gに設定することによって、φ5cm の比較的衝撃エネルギーの小さい落石が捉えられることが確認できた。また、延長 10mの仮設防護柵の両側に設置した 2 台の検知センサーによって、10m内の小さい落石を検知できることが確認された。一連の検証結果により、落石に対する検知漏れはないと考える。
- しかし、落石判定レベルである振幅レベル値を 0.05Gとした場合、雨だれといった微小ノイズが発生することが確認された。雨だれのような微小ノイズの分離は、10bit 程度の分解能の当該システムでは難しい。このことから、振幅レベル値の設定は現地で想定される落石の大きさ、衝撃エネルギー、さらにノイズの影響を踏まえ設定する必要がある。
- 今回の検証期間中に仮設防護柵周辺の工事に伴う、バケット型掘削機の走行や掘削に伴う振動、工事用モノレールのエンジンや走行に伴う振動は、当該崩落検知システムでは落石の衝撃による振動と分離ができなかった。工事振動の応答スペクトルを見ると、落石の衝撃による仮設防護柵の振動と同じ卓越周波数帯域にピークが出ている。このことから、工事振動が頻発する区域での振幅レベル値の設定には、想定する落石の大きさ、衝撃エネルギーとともに、工事振動の影響を予め考慮する必要がある。
- 検証期間中現地では氷点下の日が続き、バッテリー電源には過酷な環境であったが、検知センサーや中継ユニットのバッテリー電池は、観測期間中に切れることは無かった。また、検知センサーのポリカーボネート製ケースに外観上損傷は無く、内部への水の浸入も無かった。このことから、検知センサーは安定性や耐久性の面で実用化レベルに達していると考える。
- 今回検証用としてカメラ監視システムを導入したが、写真 4.5 に示すとおり落石状況の画像を収録することができた。今回の結果を踏まえれば、検知システムⅠとネットワーク対応型のカメラ監視システムの組み合わせることによって、現地にネットワーク環境が整っていれば、落石状況を直接視認するといったニーズにも十分応えられるものと考える。

4.5 検知センサーに要求される性能

4.5.1 速度型崩落検知システム（仮設防護柵の落石・小崩落の規模を推定するシステム）

(1) 基礎実験及び長期検証実験結果から求められる性能

① システムの周波数特性

- 200Hz 以上 300Hz 未満の卓越周波数の比率が 85%以上であることが判明した。
- 検知センサーとして使用する周波数帯は、200Hz～400Hz ないしは 200Hz～500Hz とする。

② システムの振幅範囲

- 鋼製横矢板で検知した全落石振動の最大振幅は約 4mKine～約 1,420mKine（1.4Kine）であり、累積頻度上の中央値は約 60mKine であった。
- 検知センサーとしての性能上、最大振幅で 2,000mKine 程度までの振動をひずまないように記録できる性能が必要であり、分解能は、4mKine の 1/50 である 0.08mKine 程度を確保する。
- 0.08mKine～2,000mKine の範囲は、A/D 分解能で 15bit に相当する。

③ 落石イベント

- 最大振幅値と継続時間の積を「振動エネルギー」と定義づけたが、振動エネルギーの値で 20～4,000 の間はほぼ直線的な関係となっており、今後落石の発生予測に利用できる可能性がある。
- 処理ソフトウエアとして、落石イベントのグラフ、振動エネルギーの時間別グラフなどを描画できる性能が必要である。

④ 落石の推定衝突位置

- 落石位置の推定精度は極めて高いと評価できた。
- この決定技術は仮設防護柵のように検知センサーを一列に配置するケースのみならず、洞門や待ち受け工のような構造体の天盤部分に、平面状に設置することも可能である。
- 将来的には、落石の衝突位置を推定するプログラムを組み込む。

⑤ 落石の推定質量（参考）

- 落石振動の最大振幅値から、落石の質量をある程度推定できることが分かったが、落石質量の推定にあたり、衝突速度、密度と反発係数などを考慮していないため、今後推定精度を高める研究が必要であると考えている。
- 将来的には、落石の質量を推定するプログラムを組み込むことが考えられる。

(2) 検知センサーの性能

以上実施した長期検証実験の結果，表 4.3 に示す速度型崩落検知システムの性能は、検証実験に耐えられることが確認されたことから、速度型地震計を使用する「市販型の検知センサー」としての要求性能を表 4.12 の設定を考える。

表 4.12 速度センサーを使用した崩落検知システムの要求性能

種 類	数 量	要 求 仕 様	
振動センサー	1成分3個	形　式	MC型小型地震計 （速度計：水平動のみ）
		固有周波数	14Hz （28Hz可）
観測部/送信部	3成分1台	周 波 数	200Hz～500Hz
		サンプリング	1kHz （1msec）
		分 解 能	16Bit以上
		通信方式	Bluetooth （通信距離：見通約300m）
		記録方式	波形の連続送出方式 （トリガー無し）
記 録 部	1台	装置形式	WindowsXp/7 パソコン
		通信方式	Bluetooth （通信距離：見通約300m）
		観測方式	連続記録方式 （100GByteで約200日）
処 理 部 （記録部と兼用）	1台	モニター機能	波形を常時表示することによる監視
		トリガー機能	ソフトウエアトリガー方式 （不感時間帯の除去）
		ノイズ除去機能	卓越周波数　：200Hz（変更可）以下はノイズ 振動継続時間：0.1S（変更可）以下は空電ノイズ
		波形区分機能	落石、自動車、発破（段発）、工事など
		波形処理機能	振動エネルギー、検知位置計算*、振動エネルギー計算*
		処理結果 表示機能	1時間別（変更可）落石イベントグラフ 1時間別（変更可）振動エネルギーグラフ 1時間別（変更可）最大振幅（質量）の時間変化グラフ* 検知位置の平面分布と時間変化グラフ*
		通信機能	TCP/IP通信により波形と処理結果等を遠隔地に送出

＊ 将来的に処理プログラムに組み込む機能とすることを考える

4.5.2　加速度型崩落検知システム（仮設防護柵への落石・小崩落の発生のみを検知するシステム）

(1) 基礎実験および長期検証実験結果から求められる要求性能

- 加速度型崩落検知システムは、汎用品である MEMS 加速度センサーとマイコンレベルの演算処理機能を有する回路を組み合わせた簡易な検知システムである。したがって、前述の速度型崩落検知システムのように波形データそのものを記録し、波形データから振動の種類や大きさを識別する機能はない。
- すなわち、測定した振動データ（加速度データ）を演算回路中のフィルタリング処理によって落石を想定した周波数帯域の振動データのみ切り出し、その振動データの振幅値が一定レベルを超過した場合、落石と判別する機能を有する。この機能は、崩落検知のための最低限の要求性能である。また、自然条件の厳しい屋外での利用中、不具合なく安定して稼動することも、安定性、耐久性の面で最低限に必要な性能といえる。
- 今回の一連の実験、特に監視カメラ画像と検証用加速度型振動計による識別により、φ5cm の比較的衝撃エネルギーの小さい落石が捉えられることが確認できた。また、延長10mの仮設防護柵両側に設置した 2 台の検知センサーによって、10m範囲のφ5cm 程度の落石を検知できることが分かった。一連の検証結果により、落石に対する検知漏れはないと考える。一方、足尾地区のような厳寒期の自然条件の厳しい箇所での 4 ヶ月間の観測期間中に電池切れなどの不具合もなく稼動した。このようなことから、汎用部品である MEMS 加速度センサーを使った一連のシステムの性能は、崩落検知システムとしての最低限の要求される性能をほぼ満たしていると考える。更に、昨年度の現地実験も含め仮設防護柵の落石による振動の周波数帯域 200～500Hz を、落石判別のためのフィルタリングの周波数帯域とすることも妥当であることが確認できた。
- しかし、落石判別レベルである振幅レベル値を加速度センサーの測定下限値を 0.05Gに設定した結果、雨だれによる微小ノイズを検知することが確認された。また、仮設防護柵周辺の工事振動も、卓越周波数が落石の衝撃による振動とほぼ同じ帯域にあることから、落石による衝撃と工事振動を分離できなかった。これらの課題に対する性能の向上は、加速度型崩落検知システムの開発コストとトレードオフの関係にあり、今後の幅広い利用を目指すためには現実的でないと考える。現時点では対象とする崩落規模、形態や現地条件に応じた振幅レベル値の設定といった運用面で対処することが妥当と考える。
- 今回の検証実験での監視カメラと加速度型崩落検知システムの組み合わせにより、落石状況を直接視認することができた。この組み合わせシステムは、現地にネットワーク環境が整っていれば、落石状況をリアルタイムに視認したいといったニーズに十分応えられる。

(2) 検知センサーの性能

以上の長期検証実験の結果、表 4.4 に示す MEMS 加速度センサーを使った崩落検知システムは、落石判定レベルである振幅レベル値の設定について課題を残すが、安定性、耐久性を考慮すれば、十分実現地への適用が可能であると考える。

検証箇所のネットワーク環境の問題により、ネットワーク機能の検証が未達成であったが、長期検証実験を踏まえた最終的な性能（仕様）を表 4.13 とする。

表 4.13　ＭＥＭＳ加速度センサーを使用した崩落検知システムの性能

■共通	
電波方式	特定小電力無線　ARIB-T67準拠
無線周波数	429.25MHz～429.7375MHz、12.5KHz間隔、40chの中から10ch使用
送信電力	10mW
送信距離	100m（環境条件による）
	※検知ユニット～中継ユニット間100m、中継ユニット～メインユニット間100m
検知ユニット最大数	10台（中継ユニット当たり）
■ 検知ユニット	
電源制御	微振動センサー（ボール接点式、30gal以上で感知）
加速度センサータイプ	半導体ピエゾ抵抗型、3軸
A/D変換	サンプリング500Hz、分解能10bit
フィルタリング	デジタルフィルター（ハイパスフィルター、ローパスフィルター）
振幅レベル設定	4段階、設定下限値0.05G、設定上限値4G　※メインユニットからの変更可能
電　源	アルカリ単三電池3本
動作時間	約1年（常時警戒モードの場合）
動作温度	-10～60℃　（結露なきこと）
材質、保護等級	ポリカーボネート、IP54準拠
寸　法	60（W）×120（H）×40（D）mm　（突起物含まず）
■ 中継ユニット	
通信制御	不感帯時間（10秒）による受信待機機能
電　源	アルカリ単一電池2本
動作時間	約1年（使用条件による）
動作温度	-10～60℃　（結露なきこと）
材質、保護等級	ポリカーボネート、IP54準拠
寸　法	80（W）×160（H）×56（D）mm　（突起物含まず）
■ メインユニット	
ネットワーク機能	10BASE-T／100BASE-TX、RJ45コネクタ
警報機能	圧電ブザー
接点出力機能	無電圧タイプ、1接点、接点容量DC30V2A以下
電　源	DC6V（専用ACアダプタ）
バックアップ電源	3.6Vニッケル水素電池パック1本（動作時間：1時間程度）
動作温度	-10～60℃　（結露なきこと）
材質、保護等級	ポリカーボネート、IP54準拠
寸　法	135（W）×200（H）×50（D）mm　（突起物含まず）

5. 発生源における岩盤振動計測実験

5.1 実験目的

岩盤斜面における不安定岩塊の抽出のために、岩塊に地震計を設置し、常時微動や車両走行などによる人工振動を計測する。計測および解析は土木研究所「不安定岩盤ブロック抽出のための岩盤斜面振動計測マニュアル（案）」に準じて実施し、実験地斜面内の計測対象岩塊の相対的な不安定度を推定することを目的とする。また、同一の計測を異なる２時期に実施し、岩塊不安定度の経時変化の検出可能性を検討する。さらに、以上の計測実験をとおして、本手法の課題の抽出することを目的とする。

5.2 実験場所と実験工程

5.2.1 実験場所

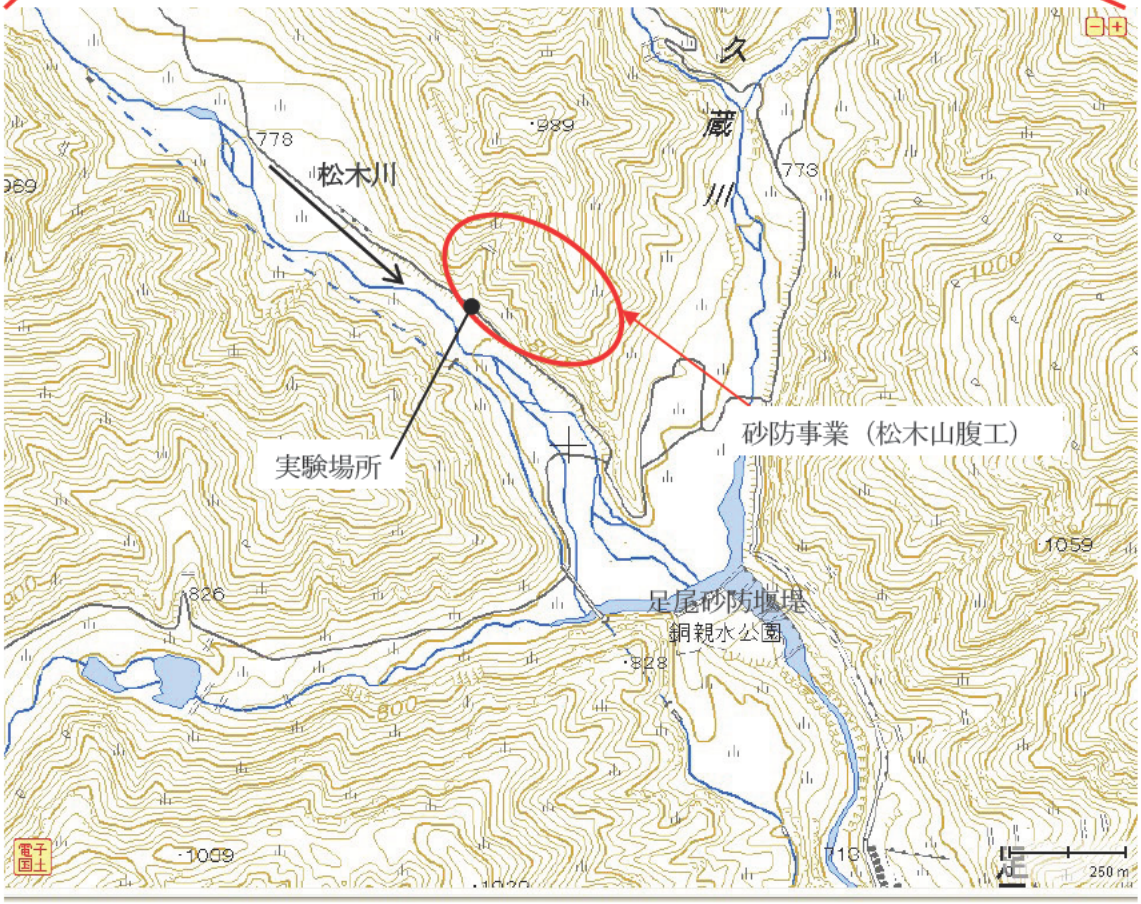
実験場所は、前述の長期実証実験と同一とした。実験場所の位置図を図 5.1 に示す。実験場所は、中禅寺湖の南南西約 5km の栃木県日光市足尾町内で、山腹工が実施されている松木川左岸斜面に設けた。写真 5.1 に示すとおり、仮設防護柵を設置した場所の背後の斜面を本実験の対象とした。

5.2.2 実験工程

計測実験は、2 回実施した。1 回目の計測で、斜面内の計測対象岩塊の相対的な不安定度を推定することができるが、2 回目の計測で同様の計測をすることで、自然条件等の相違による計測結果の変化を知ることができると考えた。実験の工程は、以下のとおりである。

- 現地下見　　平成 22 年 12 月 7 日
- 第 1 回計測
  - 計測準備　　平成 23 年 1 月 11 日
  - 計測、撤収　平成 23 年 1 月 12 日
- 第 2 回計測
  - 計測準備　　平成 23 年 4 月 21 日
  - 計測、撤収　平成 23 年 4 月 22 日

※Google Map より引用した



※国土地理院 電子国土より引用した

図 5.1　実験場所位置図

写真 5.1　実験場所の全景

5.3　実験方法

5.3.1　対象岩塊の選定

岩盤振動計測では、ある程度の大きさを有する岩塊を想定しているので、本実験では、50cm～1m 程度の大きさを持つ岩塊を計測対象として選定した。踏査の結果、写真 5.2 に示すように、No.1～7 の 7 つの岩塊を計測対象として選定した。なお、No.4～7 はひとつの岩体ではあるが、亀裂が見られるため、亀裂をはさんで地震計を設置し、振動特性の違いの有無を確認することを目的とした。

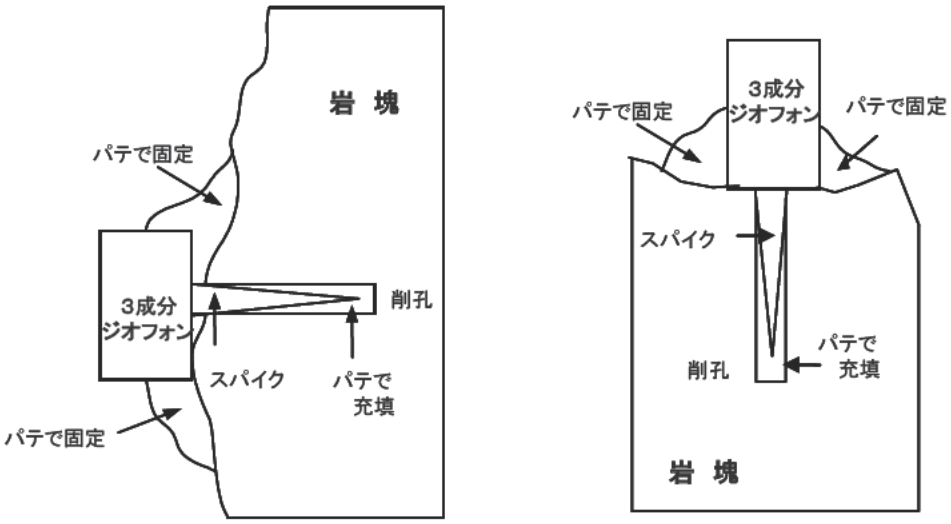
写真 5.2　選定した計測対象岩塊

5.3.2　地震計の設置

上記１～７の岩塊及び振動の基準点として安定した岩盤に地震計を設置した。

安定した岩盤は、写真 5.2 に「基盤」と記した場所で、仮設防護柵の背面に位置する。使用した地震計は固有周波数 8Hz の 3 成分（水平動 2 成分、上下動 1 成分）速度型地震計（ジオフォン）である。地震計の設置方法を図 5.2 に、設置作業状況を写真 5.3 に示す。また、すべての地震計の設置状況を、写真 5.4 に示す。

第１回と第２回計測では、そのつど地震計を設置しているが、第２回では第１回に穿孔したドリル孔を利用したほか、できるだけ同一の条件になるように設置した。



(a)　岩塊の前面に設置する場合　　(b) 岩塊の上面に設置する場合

※今回実験の No. 4 地点のように、岩塊の上面に地震計を設置したいケースがある。従来、本測定用地震計は岩塊の前面に水平に削孔してスパイクを差し込むタイプのものだけであったが、今回の実験用に地震計の下部に、鉛直方向に設置できるスパイクを有する地震計を作製し、岩塊の頂部にも容易に設置できるようにした。

図 5.2　地震計の設置方法

ハンマードリルによる穿孔

ドリル孔にパテを入れてスパイクを差し込む

方位あわせ（H1成分を南北方向にあわせた）

パテで地震計を固定する

写真 5.3　地震計の設置作業状況

写真 5.4　地震計設置状況

5.3.3　計測器

使用した測定系模式図を図 5.3 に、計測器の仕様・性能を表 5.1 に示す。

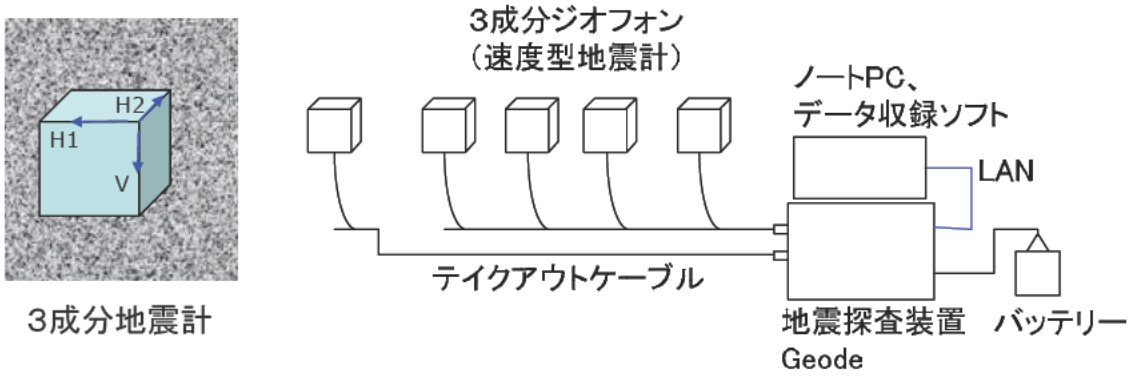


図 5.3　岩盤振動計測　測定系模式図

表 5.1　岩盤振動計測　使用機器一覧表

名称	仕様・性能		数量	メーカー
地震探査装置 GEODE（ジオード）	チャンネル数	24チャンネル	1台	Geometrics
	A/D変換	24ビット（シグマ・デルタ方式）		
	周波数特性	DC～20kHz		
	最大入力電圧	2.8Vpp		
	入力インピーダンス	20kΩ		
	プリアンプ利得	24、36 dB		
	サンプリング間隔	0.02, 0.03125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 ms		
	レコード長	16,384ポイント		
	データ形式	SEG-2フォーマット		
	電源	DC12V外部バッテリー		
	消費電力	0.65W/チャンネル		
	動作温度	-30～70℃		
	寸法	25.4cm L x 30.5cm W x 17.75cm D		
	重量	3.6kg		
地震計　Model-1716	成分数	3成分（水平動2成分、上下動1成分）	8個	応用地質(株)
	ジオフォンユニット	GS-20DX（Geospace製）		
	固有周波数	8Hz		
	電圧感度	276mV/kine　　＊kine=cm/s		
	コイル抵抗	395Ω		
	シャント抵抗	340Ω		
その他	テイクアウトケーブル	12成分	2巻	
	シールド線	6芯　50m	8巻	
	バッテリー	12V	1個	
	ハンマードリル	充電式、ドリル径12.5mm	1台	

5.3.4　計測方法

設置した 8 ヵ所すべての地震計で同時に振動計測を行なう。振動源は、常時微動、車両走行振動（計測対象斜面から約 50m）、重機振動（計測対象斜面から約 100m）、かけやによる打撃振動（計測対象斜面から約 20m）などを利用した（図 5.4）。A／D変換のサンプリングは 125Hz（8ms）とし、1 回の記録サンプリング数は 8,192 ポイントとした。記録長は、0.008 秒×8,192 ポイント＝約 65 秒である。図 5.5 に、1 回の（約 65 秒間の）計測波形記録例を示す。

図 5.4　利用した人工振動源の例

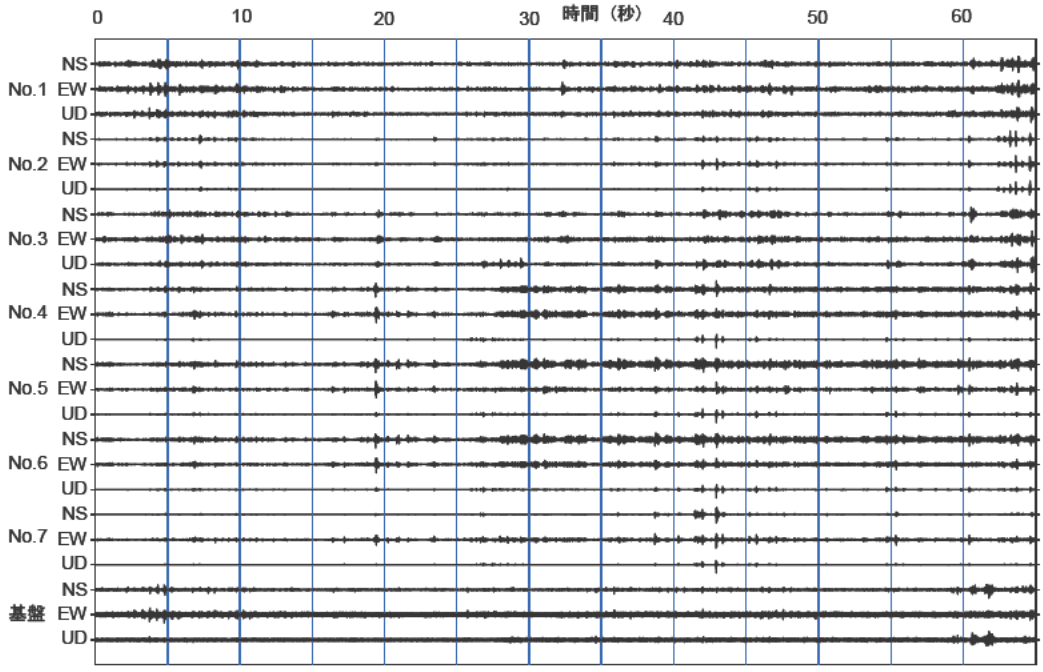


図 5.5　振動計測波形記録例（1 回の計測で得られる 65 秒間の波形記録）

5.3.5 解析方法

取得した岩盤振動計測データ（波形記録）について、以下の処理・解析を行った。

① 波形の前処理

収録された波形記録の振幅値は、データ収録装置の内部数値で表されている。これを入力電圧値に換算し、さらに地震計の感度を用いて速度振幅値に換算する。また、地震計の周波数特性を補正し、2Hz 以上で平坦な周波数特性を有する波形に補正する。さらに不要なノイズを除去するため、周波数フィルターを適用する。今回は 2～50Hz のバンドパスフィルターを適用した。

② 振動軌跡（オービット）の出力

振動波形記録をもとに、２次元平面内での軌跡を示す振動軌跡を求め出力する。振動軌跡は、南北－東西（水平面）、南北－上下（鉛直面）、東西－上下（鉛直面）の３平面に投影して表現する。

③ 周波数分析によるスペクトル及びスペクトル比の出力

振動波形記録に対してフーリエ変換を行い、周波数スペクトルを出力する。約 10 回の計測波形のスペクトルを平均し、平均スペクトルを求める。さらに、入力基盤と考えられる安定岩盤のスペクトルとその他の計測点のスペクトルとの比を求め、安定岩盤と計測対象岩塊との間で、どの周波数の振動がどの程度増幅されているかを整理する。

④ 累積振幅比の出力

振動による仕事（振動エネルギー）に対応すると考えられる累積振幅について、振動速度波形の絶対値を積分することにより求める。安定岩盤に比べて、不安定岩盤は相対的に大きく振動する。各測定点の累積振幅値を安定岩盤の累積振幅値で割ることにより累積振幅比を求める。

⑤ 解析結果の評価

解析結果をもとに、各岩塊の振動特性をまとめ、当該斜面における相対的な岩塊の安定性（主として周辺岩盤との密着性に起因する）について評価する。

5.4 実験結果

解析に使用した波形記録は、基本的には突発的なノイズを含まない常時微動データであるが、風や工場の振動なども含まれている。

① 波形の前処理

図 5.6 (a)(b)に、波形記録の例を示す。すべての地震計の成分ごとに時系列波形を示している。横軸は時間で、65 秒間のデータである。縦軸は振幅（単位は mkine）で、相対的な振幅は保存してある（本図上ですべての波形の振幅は比較できる)。オリジナル記録に、地震計の周波数特性の補正を施した上で、2～50Hz のバンドパスフィルターを適用した。なお、図 5.6(ａ)は第 1 回計測結果、図 5.6(ｂ)は第 2 回計測結果である（以下、同じ)。第 1 回と第 2 回の波形を比較すると、第 2 回の振幅の方が全体的に大きい。その原因として、第 1 回に比べ第 2 回計測時の方が風の影響を受けている可能性があることや、第 1 回計測時には稼働していなかった松木川上流約 500m の砕石工場が第 2 回計測時には稼働していたことなどが考えられる。

② 振動軌跡（オービット）の出力

図 5.7 (a)(b)に、２次元平面内での振動軌跡を示す。振動軌跡は、東西－南北（水平面)、東西－上下（鉛直面)、南北－上下（鉛直面）の３平面について表示した。

③ 周波数分析によるスペクトル及びスペクトル比の出力

図 5.8 (a)(b)に、周波数スペクトルを示す。11 回分の計測波形のスペクトルを平均し、平均スペクトルを求めたものである。11 回としたのは、取得したデータのうち、突発的なノイズなどのないデータを選定し、第 1 回計測と第 2 回計測で同じ回数となるよう、できるだけ多くのデータを選び出した結果である。

図 5.9 (a)(b)に、入力基盤と考えられる安定岩盤とその他の計測点のスペクトル比を示す。この図を見ると、第 2 回計測時に、とくに No.4～7 の水平動成分に約 11Hz のスペクトルピークが強く現れている。これは、前述の砕石工場からの振動ノイズによるものではないかと推察する。

④ 累積振幅比の出力

表 5.2 (a)(b)に、累積振幅比を示す。また図 5.10 に、第 1 回、第 2 回計測の各成分の累積振幅比比較図を示す。図中、青色が第 1 回計測結果、赤色が第 2 回計測結果であり、●が N-S 成分、■が E-W 成分、▲が U-D 成分である。

⑤ 解析結果の評価

第 1 回の計測結果からは、もっとも大きく揺れているのは No.4 であり、次に No.5、6、7 が同程度である。No.4 と他の 3 点は、スペクトル形状も似ていることから、亀裂によって分離しておらず、ひとつの岩塊と考えることができる。ただし、10～20Hz に明瞭なスペクトルピークを有し、累積振幅比も大きいことから、相対的に不安定な岩塊ということができる。これは、第 2 回計測結果でも同様である。

No.1、No.2 は、第 1 回計測、第 2 回計測ともに明瞭なスペクトルピークは示さず、振幅も小さいことから、比較的安定な岩塊ということができる。

No.3 は、第 1 回計測では上記の中間的な振動特性を示し、やや不安定な岩塊と考えられる。第 2 回の計測では、20Hz 以下に明瞭なスペクトルピークが現れ、振動軌跡も No.4 と同様、水平面内の動きが特に大きくなった。

以上の評価結果を表 5. 3 にまとめた。

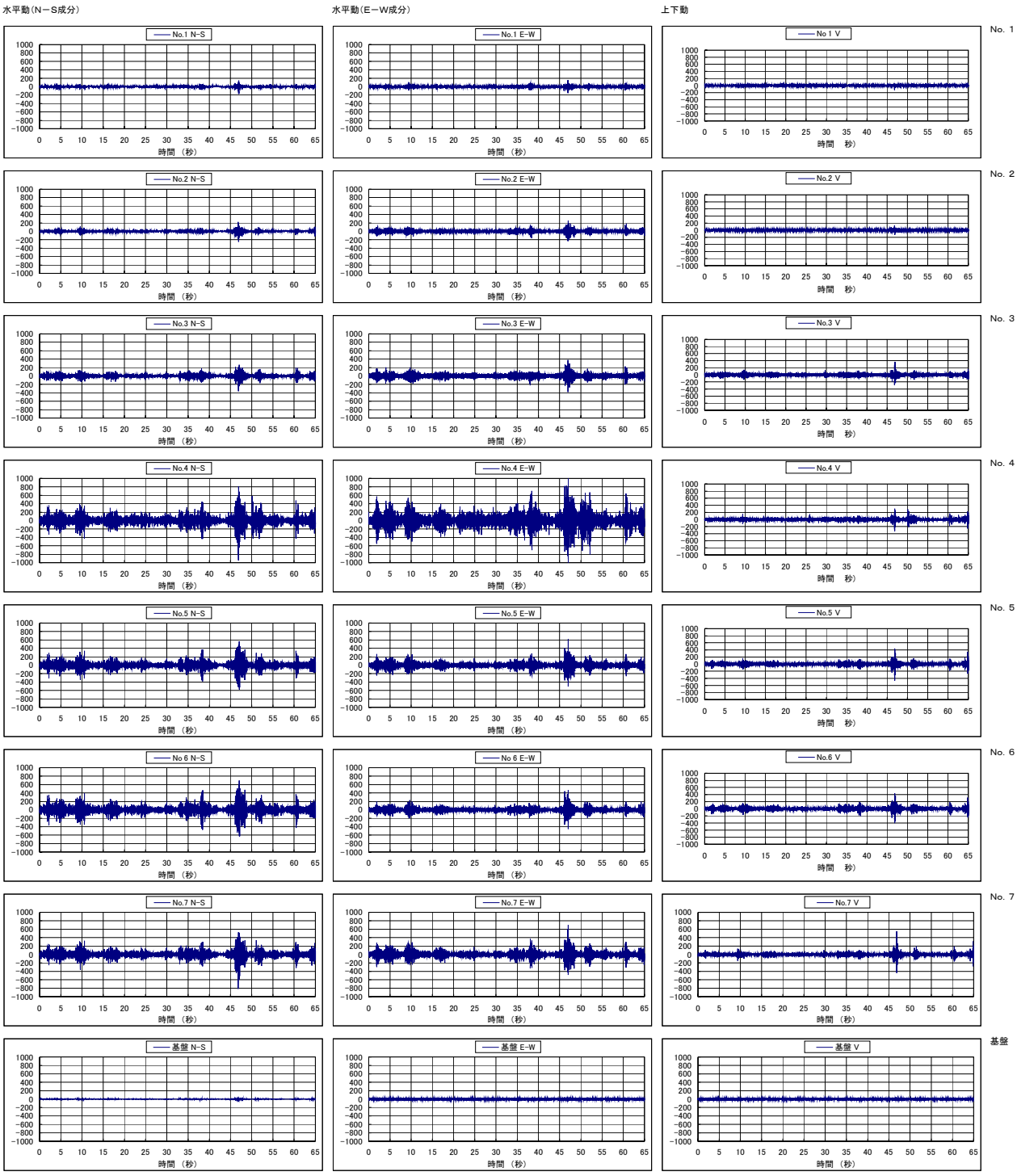


図 5.6（ａ）　波形記録例（第１回；2011.1.12）

(65 秒間観測データ、ジオフォン周波数特性補正、2-50Hz バンドパスフィルター)

(縦軸は振動速度振幅で単位は mkine)

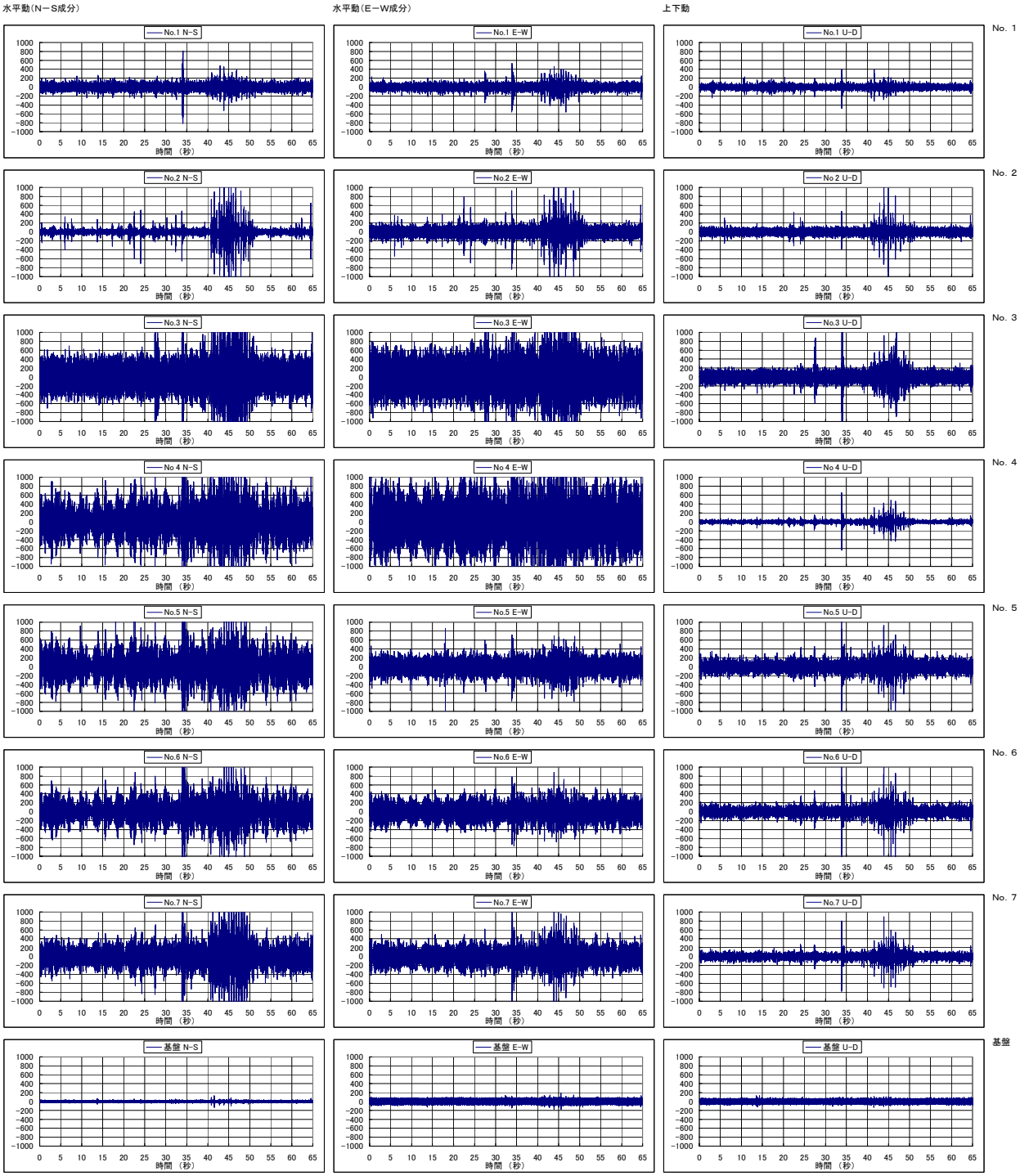


図 5.6（ｂ）　波形記録例（第 2 回；2011.4.22）

(65 秒間観測データ、ジオフォン周波数特性補正、2-50Hz バンドパスフィルター)

(縦軸は振動速度振幅で単位は mkine)

(第 1 回計測との比較のため、振幅軸は同一とした。そのため波形はスケールオーバーしているが飽和はしていない)

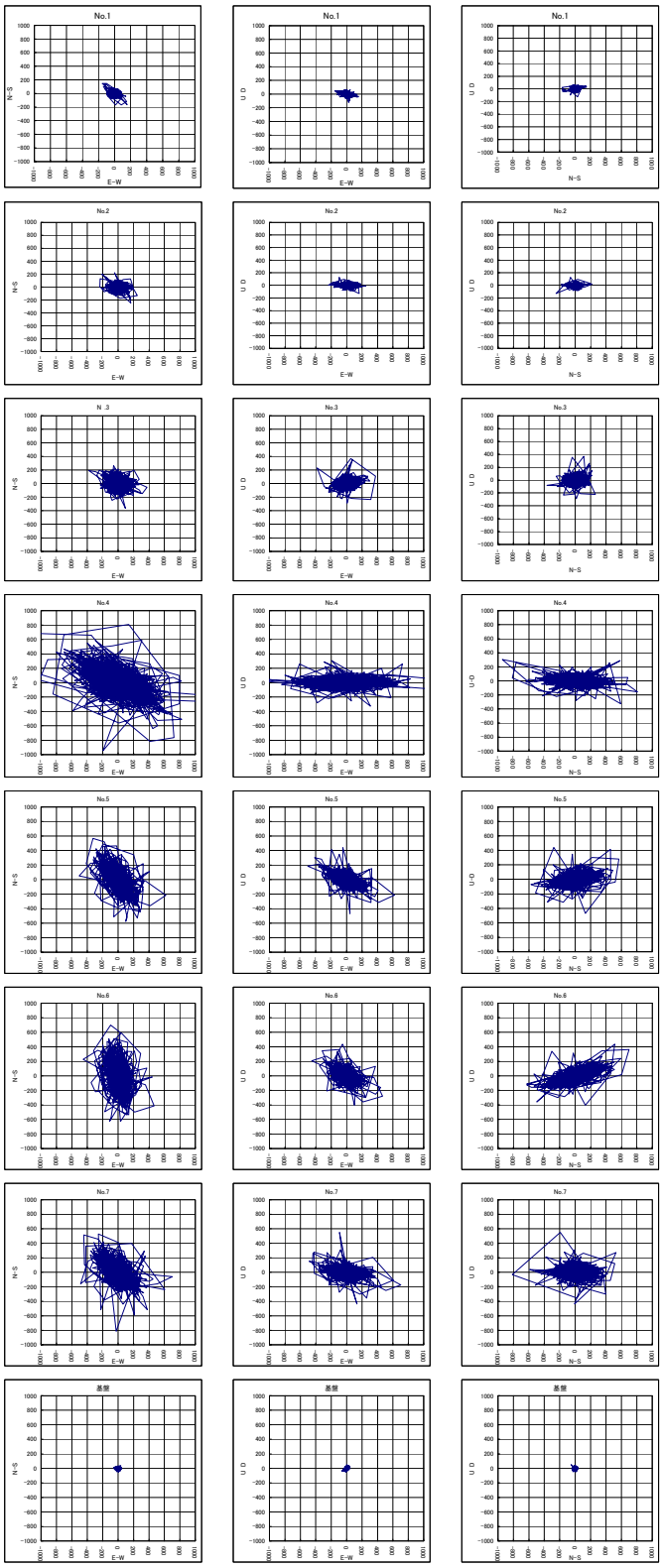


図 5.7（ａ）　振動軌跡例（第 1 回；2011.1.12）（65 秒間データ）

（縦軸・横軸は各成分の振動速度振幅で単位は mkine）

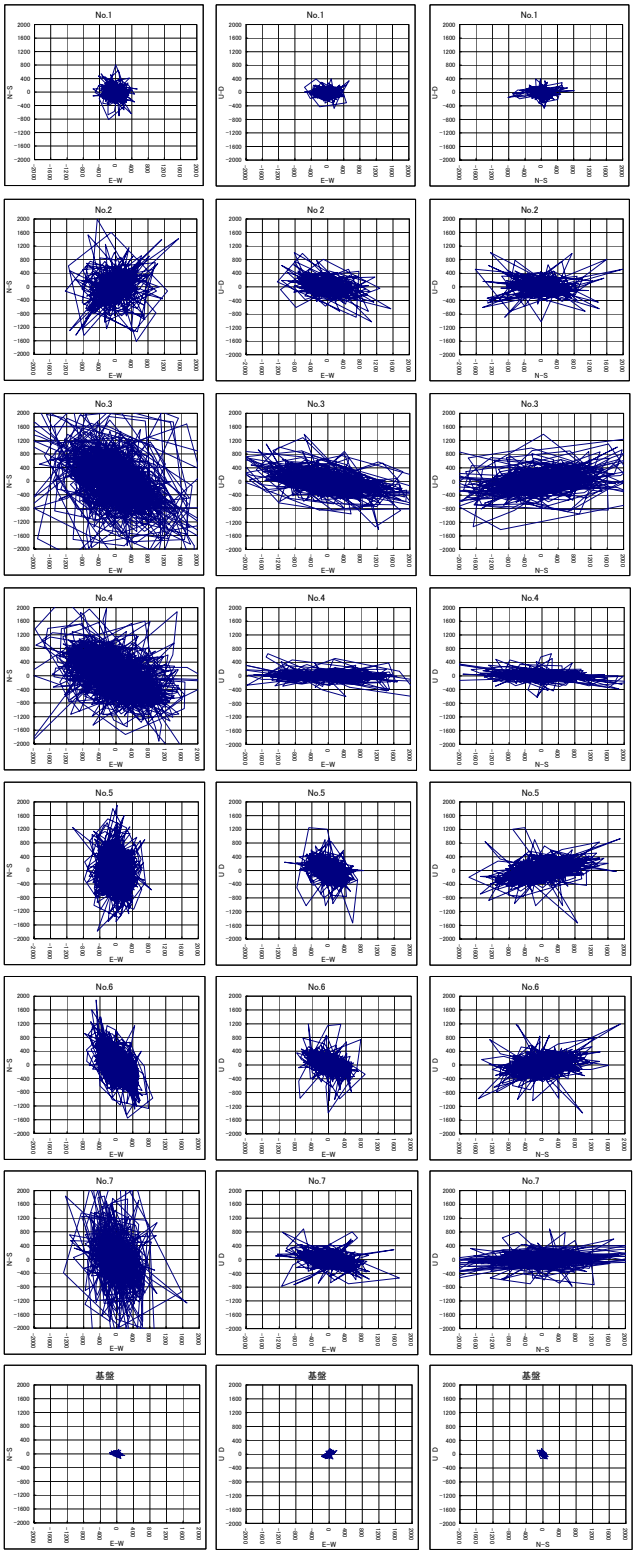


図 5.7（ｂ）　振動軌跡例（第 2 回；2011.4.22）(65 秒間データ)

(縦軸・横軸は各成分の振動速度振幅で単位は mkine)

※ 縦軸・横軸とも第 1 回計測データ（図 5.7(ａ)）の 2 倍として表示

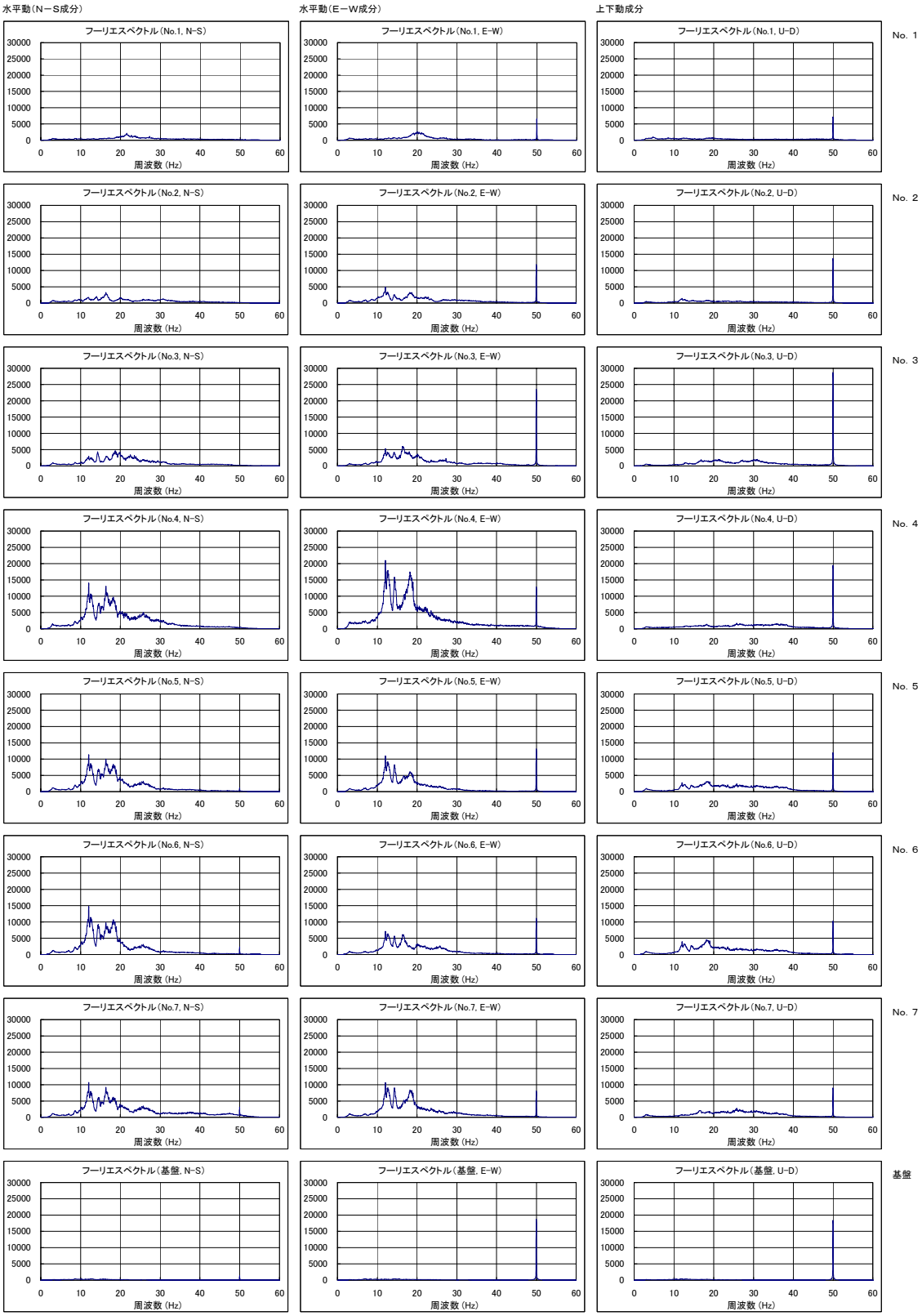


図 5.8（ａ）　フーリエスペクトル（第 1 回；2011.1.12）

(65 秒間データのスペクトル×11 データの平均スペクトル)

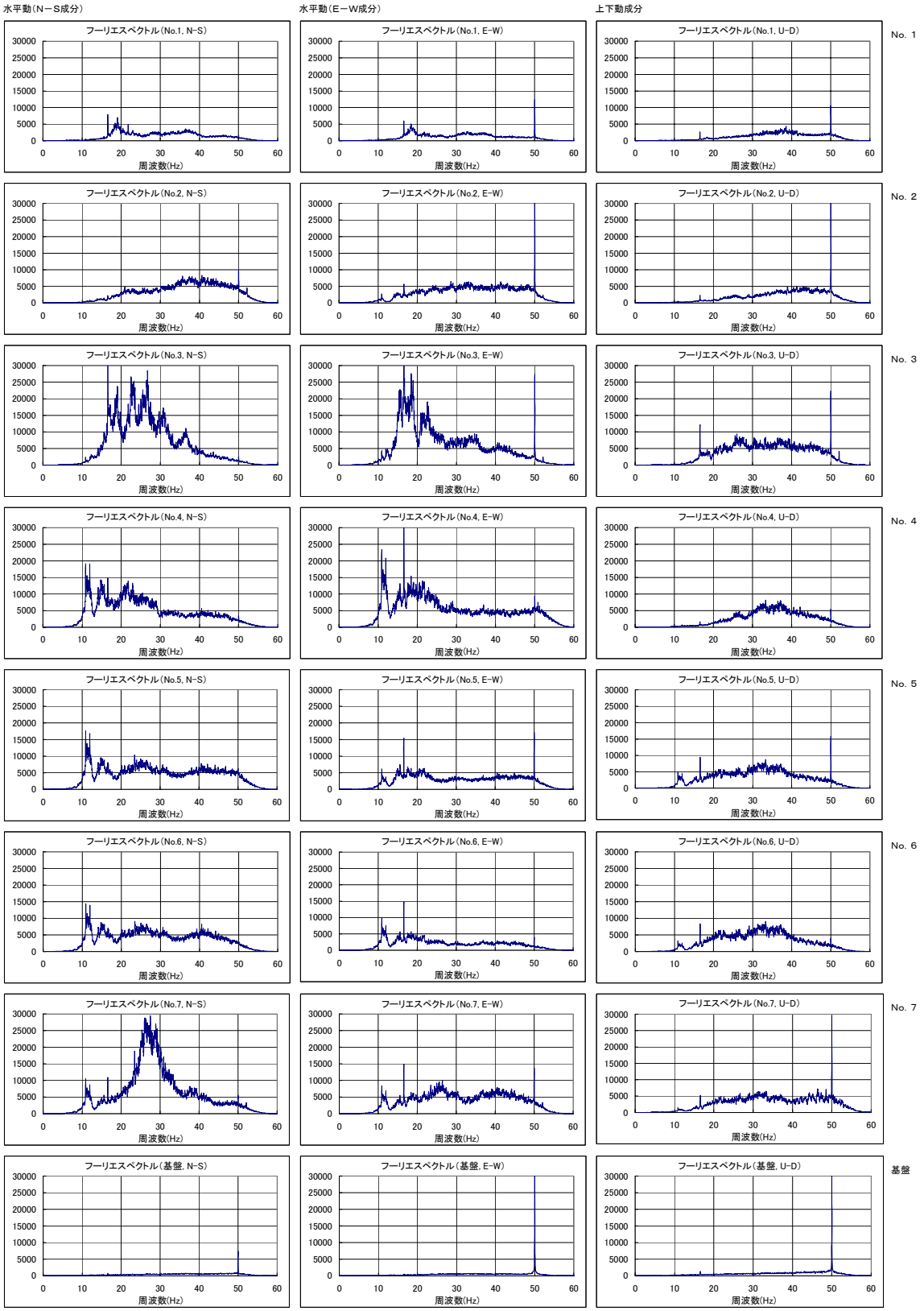


図 5.8（ｂ）　フーリエスペクトル（第 2 回；2011.4.22）

(65 秒間データのスペクトル×11 データの平均スペクトル)

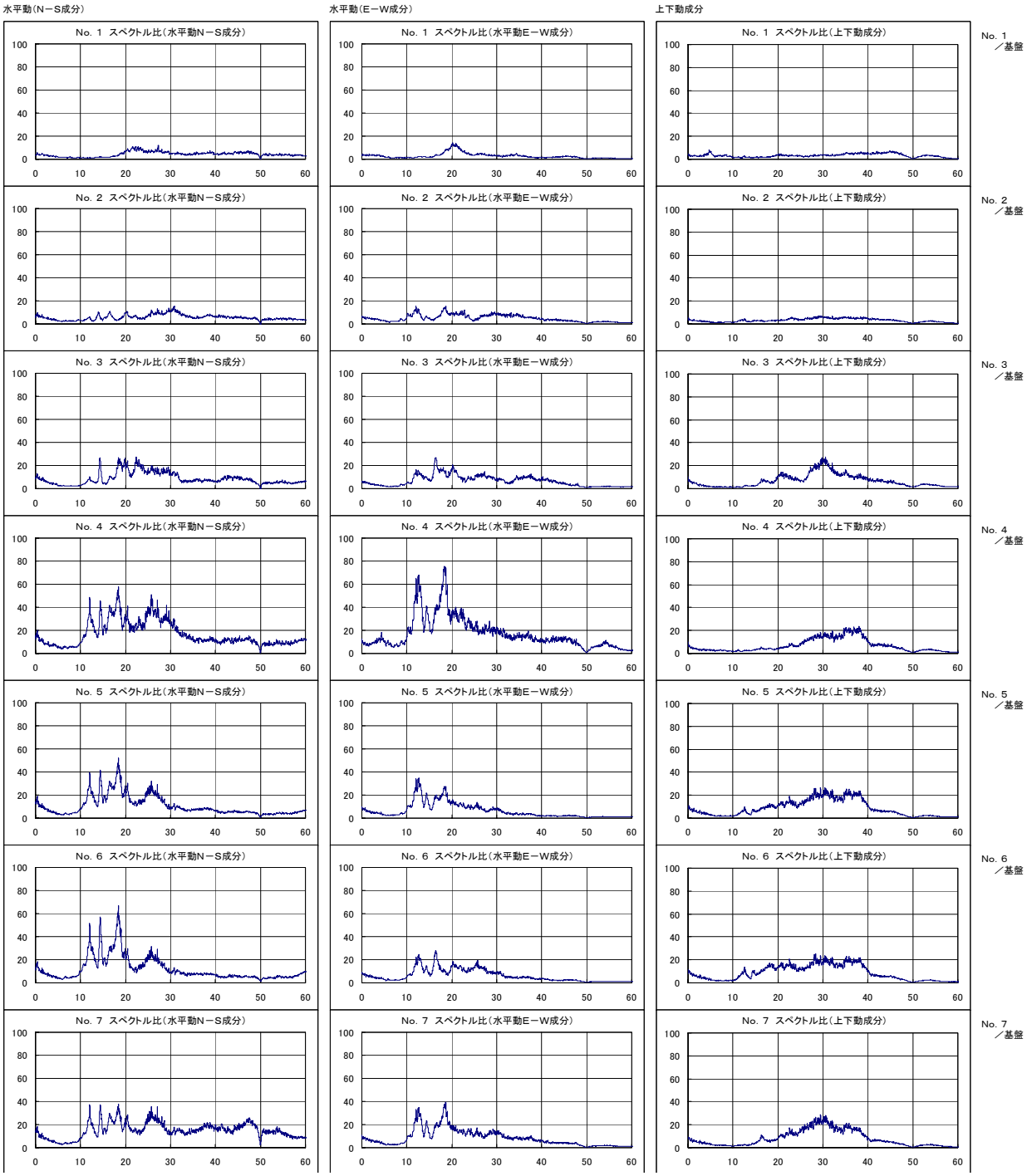


図5.9（ａ）　スペクトル比

（第１回；2011.1.12）

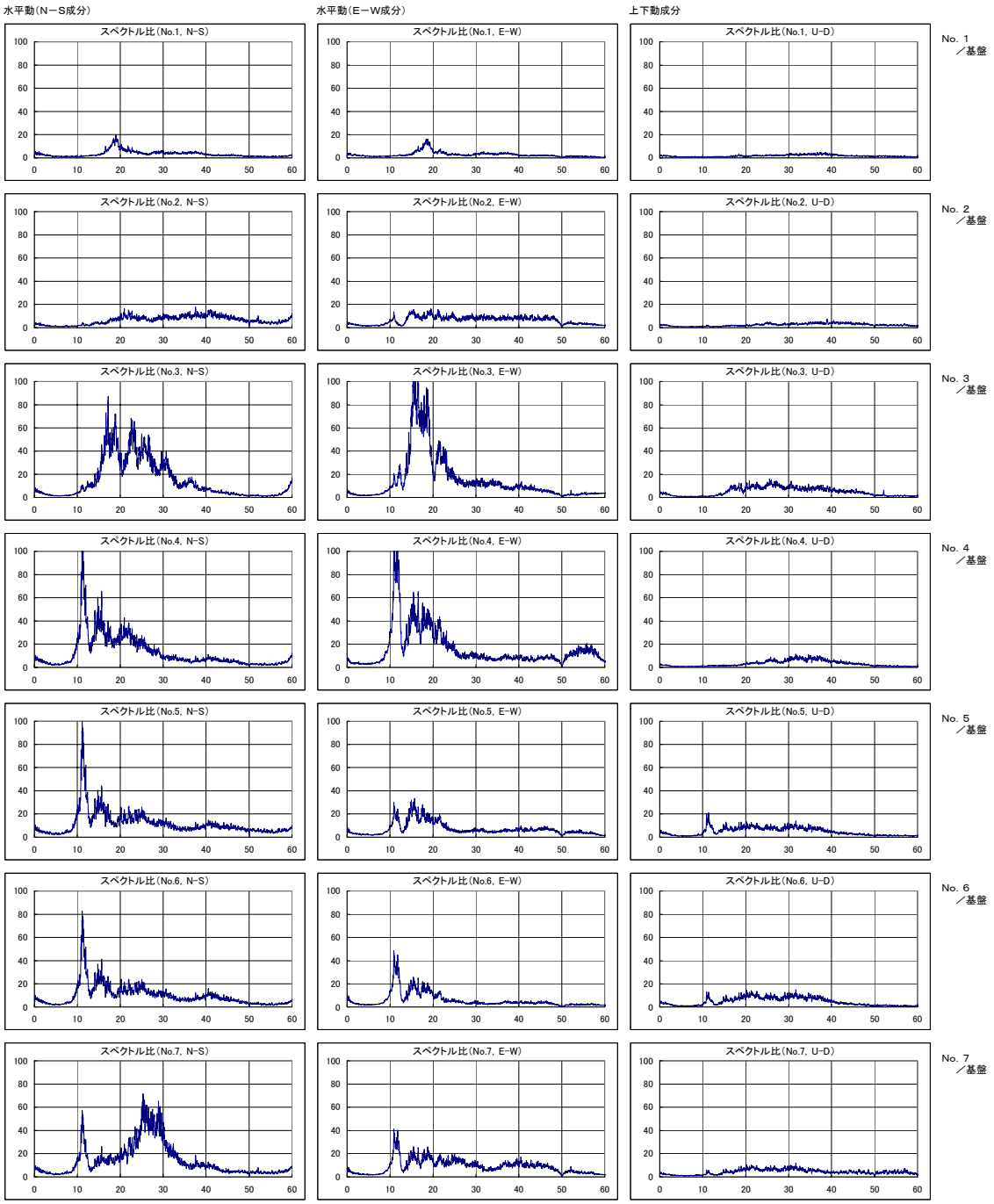


図5.9（ｂ）　スペクトル比

(第2回；2011.4.22)

表 5.2（ａ）　累積振幅比

第 1 回（2011.1.21）

累積振幅比

	N-S	E-W	U-D
No.1	3.25	0.78	0.58
No.2	4.47	1.31	0.87
No.3	8.00	2.10	1.82
No.4	20.41	5.23	1.34
No.5	15.55	2.38	1.40
No.6	18.63	1.89	1.53
No.7	14.68	2.58	1.16

表 5.2（ｂ）　累積振幅比

第 2 回（2011.4.22）

累積振幅比

	N-S	E-W	U-D
No.1	4.28	1.86	1.20
No.2	4.41	3.23	1.62
No.3	21.47	13.65	4.00
No.4	25.29	15.32	1.97
No.5	21.31	5.20	4.57
No.6	17.96	6.07	3.87
No.7	17.61	6.31	2.91

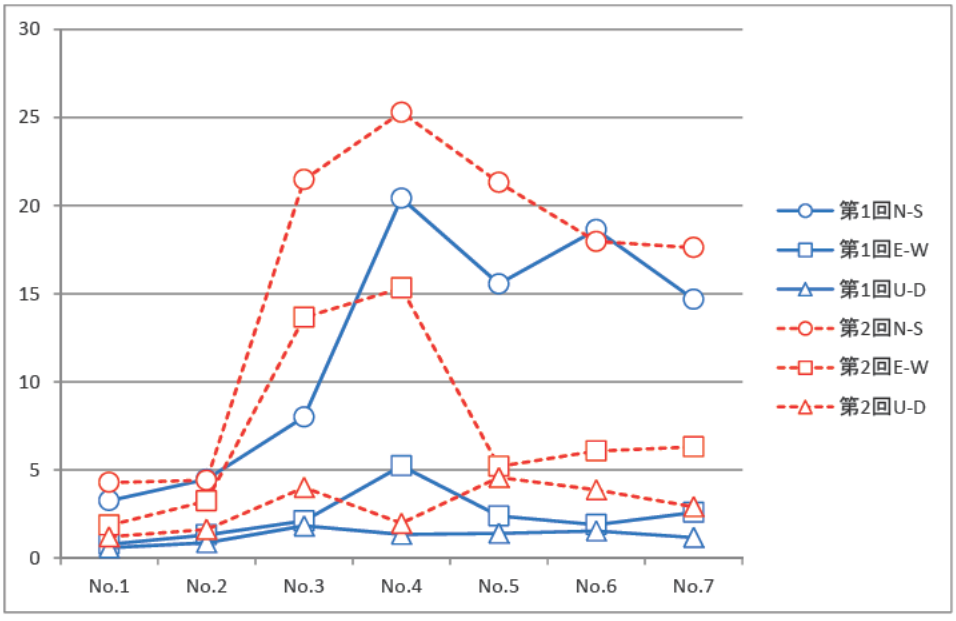


図 5.10　累積振幅比 比較図

表 5.3　第 1 回計測と第 2 回計測による岩塊の安定性評価

観測点	第 1 回計測結果	第 2 回計測結果
No.1	比較的安定	比較的安定
No.2	比較的安定	比較的安定
No.3	やや不安定	不安定
No.4	不安定	不安定
No.5	不安定	不安定
No.6	不安定	不安定
No.7	不安定	不安定

5.5　岩盤振動計測実験で確認できたこと

① 常時微動、車両走行、カケヤ打撃などで、不安定岩塊の固有振動(周波数 10～30Hz 程度)を確認した。

② 主としてスペクトル比や振動軌跡、累積振幅比といった振動特性から、岩塊の不安定度を評価できる可能性を示した。

③ ただし、2 回の間で振動源の変化があり、特徴的な周波数成分(砕石工場の振動と思われる約 11Hz の振動)を持つノイズが混入したため、これを除いて不安定度の判定をした。

5.6　課題

① 地震計の設置に予定以上の時間を要した。これは、1)一部の岩塊が硬くハンマードリルによる穿孔に時間がかかったことと、2)気温が低かったためパテを軟らかくするのに時間がかかったことなどによる。今後、地震計設置方法にさらに工夫が必要と考える。

② 時系列な比較によって不安定化を判断することができると考えているが、実際にどの程度不安定化したといえるのか、比較データがない。今後、他の既存手法などにより不安定化の進行が確認された岩塊を対象に本手法を適用し、比較データの蓄積が必要である。

6. 道路管理のための落石頻度に関する目安値の検討

6.1 目安値の設定方法

6.1.1 前提条件

仮設防護柵は、斜面等の工事に伴う小規模な飛石や落石から通行者・通行車両を防護する目的で設置されており、施工期間や設置範囲が限定された仮設構造物である。大規模な落石や崩落を想定した設計が行われているケースは少なく、斜面対策としての効果を見込むことは困難である。

斜面からの落石の発生に関しては、繰り返し発生しやすい環境(場所)があることが知られているが、発生の時期や頻度については各地域特有の誘因に応じた概略の傾向が把握されている程度である。

一方、斜面内に地すべり土塊や緩み岩塊などの周囲より安定度の低い部分が存在する場合、これらの変形や移動（以降、「斜面変動」と呼ぶ）に伴って移動体周辺で落石が発生する場合がある。この部分の不安定化が徐々に進行し、やがて大規模な崩落につながる際には、移動体周辺の落石の量や発生頻度が徐々に増加する場合も想定され、落石の発生傾向から斜面崩落の前兆を把握できる可能性がある。

本研究では仮設防護柵に設置したセンサーによってこのような前兆を把握し、斜面崩落による被害を回避することを目的としている。

仮設防護柵の機能は、飛石・小落石といった比較的リスクが小さい（発生頻度大　被害の大きさ小）現象を対象としており、本システムは仮設防護柵の機能を超過する現象のうち、小規模な前兆現象を伴うものを事前に検知して通行を遮断することにより、広い意味で施設機能を補うものといえる。従って、前兆現象を伴わない崩落や、前兆現象はあっても個々の落石が大きい場合等には対応することができない（図 6.1）。

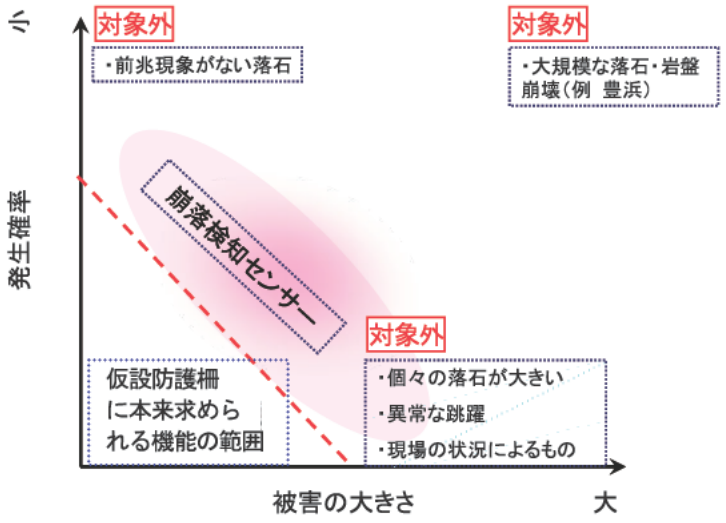


図 6.1　崩落検知センサーによる前兆把握の対象となる現象とリスク概念図

また、前述のとおり仮設防護柵には斜面対策の効果は期待されていないため、仮設防護柵の機能を超える可能性のある現象(大規模な落石､マスとしての斜面不安定化現象)が具体的に把握された時点で、現象に応じた応急対策や監視体制をとることが本検討の前提条件である。

6.1.2　方法及び手順

大規模な斜面変動に先立って落石や小規模な崩落が発生した事例から、これらを斜面変動の前兆現象と判断するための目安値(この頻度を超えて落石が発生すると斜面変動が発生する)を設定した。

同様の手法を試験地で適用し、目安値の妥当性の確認と課題の抽出を行った。

一般に、斜面における変動状況の評価や大移動が発生する時刻の予測は、移動速度の変化が連続的に把握できる地すべり現象を対象に実施され、その有効性を含めて十分認知されている。

評価や予測には、一定期間内の移動や変形の量(速度)に対して、経験的な目安値(管理基準値もしくは目安値：例えば地盤伸縮計の時間当たり変位量　等）が利用される場合が多い。

通常の斜面で発生する落石は、それぞれ個別の安定性を持った浮き石や転石に、何らかの誘因が作用した結果落下を開始するので、個々の発生機構に相互の関連性は乏しい。

しかし、斜面変動に伴って発生する落石は、移動体の運動機構が支配的な要因となるため、発生の頻度や継続性は地すべり変動に類似のものになることが想定される。このため、以下のような特徴に着目して落石の発生傾向を判別する目安値を設定し、関連する斜面変動の可能性有無を判断する材料とした。

①　通常斜面での定常的な落石発生傾向を上回る頻度と累積性を持つこと
②　①の傾向が他の斜面と区分される一定の広がりを持つ範囲内で認められること

仮設防護柵は工事等の施工期間内に限定して設置される場合が多く、①の定常的な傾向を定量的に把握することは一般に困難である。このため、現地状況からの定常的な発生傾向の推定に加えて､防護柵に設置したセンサーで検知される落石の頻度及びその変化にも着目するものとする。

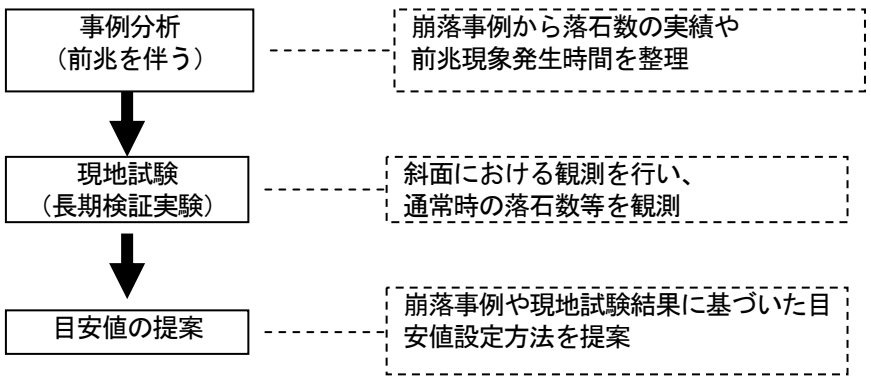


図 6.2　本検討における目安値提案への流れ

6.2　事例分析

6.2.1　対象箇所

目安値の設定方法の検討に際して、以下の各箇所のデータを用いた事例分析を行った。

6.2.2 に示す３例は、ある程度規模の大きい移動体本体が、大規模に崩落する前に何らかの前兆現象を伴った事例である。

これに加えて、本研究で現地実証試験を行った栃木県日光市足尾町での落石検知データを分析した。

6.2.2　大規模変動事例

(1)　事例整理

対象の３事例の諸元及び特徴を表 6.1 のとおり整理した。

表 6.1　参考事例の特徴

項　目		A地区	B地区	C地区
崩壊のタイプ		風化岩すべり	岩盤崩壊	崩積土の崩壊*
前兆・随伴現象の有無		有り	有り	有り
誘因		融雪	不明	人為
小崩壊および落　石	小崩壊・落石発生位置	移動体周縁+表層	移動体周縁+表面	末端⇒上方
	落石崩壊回数	累計1352回	累計70回	累計55回
	移動体幅(m)	150	30	40
	移動体奥行(m)	135	20	80
	崩落部体積(m^3)	54,000	14,000	14,000
	単位幅あたり回数(回/10m)	90.3	23.3	13.8
	単位幅あたり体積(m^3/10m)	36.0	46.7	35.0
地形	傾斜角(度)	45	90	37
	比高差(m)	135	80	60
構成地質		堆積岩	火砕岩	崩積土(安山岩)
発生時期		2006/5/13	1997/8/27	2005/2/1

*本体は岩盤すべり

(2)　目安値の検討

目安値設定に当たっては、規模や特徴が異なる事例を同列で比較するために、以下の基準を設けて落石回数を比較した。

①単位幅（10m）あたりの落石数を比較

②大規模崩落発生前 24 時間の落石発生傾向を比較

②については、観測開始から崩落までの時間が最短のＡ地区の事例（23 時間）を考慮した。

各事例において、目安値を設定する際の基準時間を複数仮設定し、毎時間の単位幅あたりの落石回数（累積および各単位時間あたり）を比較した結果を**表 6.2** に示す。

表 6.2　単位幅当たりの落石頻度

単位幅あたりの落石頻度（累積）			
崩壊までの時間	数値		
	C 地区	A 地区	B 地区
1	10.5	90.1	18.3
2	9.5	88.8	14.0
3	9.0	81.3	6.7
4	9.0	62.5	6.0
5	9.0	60.9	5.7
6	9.0	60.0	5.3
7	8.0	57.8	4.7
8	8.0	54.7	4.3
9	7.3	53.5	3.3
10	7.0	53.1	2.7
11	7.0	52.2	2.7
12	6.5	45.9	2.7
13	6.3	25.5	2.7
14	6.0	21.1	2.7
15	0.0	17.7	2.7
16	0.0	15.6	2.7
17	0.0	14.3	2.7
18	0.0	12.0	1.7
19	0.0	10.3	1.0
20	0.0	8.2	0.7
21	0.0	6.0	0.7
22	0.0	0.0	0.7
23	0.0	0.0	0.3
24	0.0	0.0	0.0

単位幅あたりの落石頻度（1時間）			
崩壊までの時間	数値		
	C 地区	A 地区	B 地区
1	1.0	1.3	4.3
2	0.5	7.5	7.3
3	0.0	18.9	0.7
4	0.0	1.6	0.3
5	0.0	0.9	0.3
6	1.0	2.2	0.7
7	0.0	3.1	0.3
8	0.8	1.2	1.0
9	0.3	0.5	0.7
10	0.0	0.9	0.0
11	0.5	6.3	0.0
12	0.3	20.5	0.0
13	0.3	4.4	0.0
14	6.0	3.4	0.0
15	0.0	2.1	0.0
16	0.0	1.3	0.0
17	0.0	2.3	1.0
18	0.0	1.7	0.7
19	0.0	2.1	0.3
20	0.0	2.2	0.0
21	0.0	6.0	0.0
22	0.0	0.0	0.3
23	0.0	0.0	0.3
24	0.0	0.0	0.0

単位幅あたりの落石頻度（6時間）			
時間軸	数値		
	C 地区	A 地区	B 地区
1	2.5	32.3	13.7
2	1.5	34.1	9.7
3	1.8	27.8	3.3
4	2.0	9.4	3.3
5	2.0	8.7	3.0
6	2.5	14.1	2.7
7	1.8	32.3	2.0
8	2.0	33.7	1.7
9	7.3	35.9	0.7
10	7.0	37.5	0.0
11	7.0	37.9	0.0
12	6.5	33.9	1.0
13	6.3	15.1	1.7
14	6.0	12.9	2.0
15	0.0	11.7	2.0
16	0.0	15.6	2.0
17	0.0	14.3	2.3
18	0.0	12.0	1.7
19	0.0	10.3	1.0
20	0.0	8.2	0.7
21	0.0	6.0	0.7
22	0.0	0.0	0.7
23	0.0	0.0	0.3
24	0.0	0.0	0.0

単位幅あたりの落石頻度（12時間）			
時間軸	数値		
	C 地区	A 地区	B 地区
1	4.3	64.7	15.7
2	3.5	67.7	11.3
3	9.0	63.7	4.0
4	9.0	46.9	3.3
5	9.0	46.5	3.0
6	9.0	48.0	3.7
7	8.0	47.5	3.7
8	8.0	46.5	3.7
9	7.3	47.5	2.7
10	7.0	53.1	2.0
11	7.0	52.2	2.3
12	6.5	45.9	2.7
13	6.3	25.5	2.7
14	6.0	21.1	2.7
15	0.0	17.7	2.7
16	0.0	15.6	2.7
17	0.0	14.3	2.7
18	0.0	12.0	1.7
19	0.0	10.3	1.0
20	0.0	8.2	0.7
21	0.0	6.0	0.7
22	0.0	0.0	0.7
23	0.0	0.0	0.3
24	0.0	0.0	0.0

単位幅あたりの落石頻度（18時間）			
時間軸	数値		
	C 地区	A 地区	B 地区
1	10.5	79.8	17.3
2	9.5	80.6	13.3
3	9.0	75.3	6.0
4	9.0	62.5	5.3
5	9.0	60.9	5.3
6	9.0	60.0	5.3
7	8.0	57.8	4.7
8	8.0	54.7	4.3
9	7.3	53.5	3.3
10	7.0	53.1	2.7
11	7.0	52.2	2.7
12	6.5	45.9	2.7
13	6.3	25.5	2.7
14	6.0	21.1	2.7
15	0.0	17.7	2.7
16	0.0	15.6	2.7
17	0.0	14.3	2.7
18	0.0	12.0	1.7
19	0.0	10.3	1.0
20	0.0	8.2	0.7
21	0.0	6.0	0.7
22	0.0	0.0	0.7
23	0.0	0.0	0.3
24	0.0	0.0	0.0

単位幅あたりの落石頻度（24時間）			
時間軸	数値		
	C 地区	A 地区	B 地区
1	10.5	90.1	18.3
2	9.5	88.8	14.0
3	9.0	81.3	6.7
4	9.0	62.5	6.0
5	9.0	60.9	5.7
6	9.0	60.0	5.3
7	8.0	57.8	4.7
8	8.0	54.7	4.3
9	7.3	53.5	3.3
10	7.0	53.1	2.7
11	7.0	52.2	2.7
12	6.5	45.9	2.7
13	6.3	25.5	2.7
14	6.0	21.1	2.7
15	0.0	17.7	2.7
16	0.0	15.6	2.7
17	0.0	14.3	2.7
18	0.0	12.0	1.7
19	0.0	10.3	1.0
20	0.0	8.2	0.7
21	0.0	6.0	0.7
22	0.0	0.0	0.7
23	0.0	0.0	0.3
24	0.0	0.0	0.0

0～5	5～10	10～15	15～

単位：個/（単位時間・10mあたり）

崩落発生時を基準とした 24 時間の単位幅（10m）あたりの落石累積頻度を図 6.3 に示す。

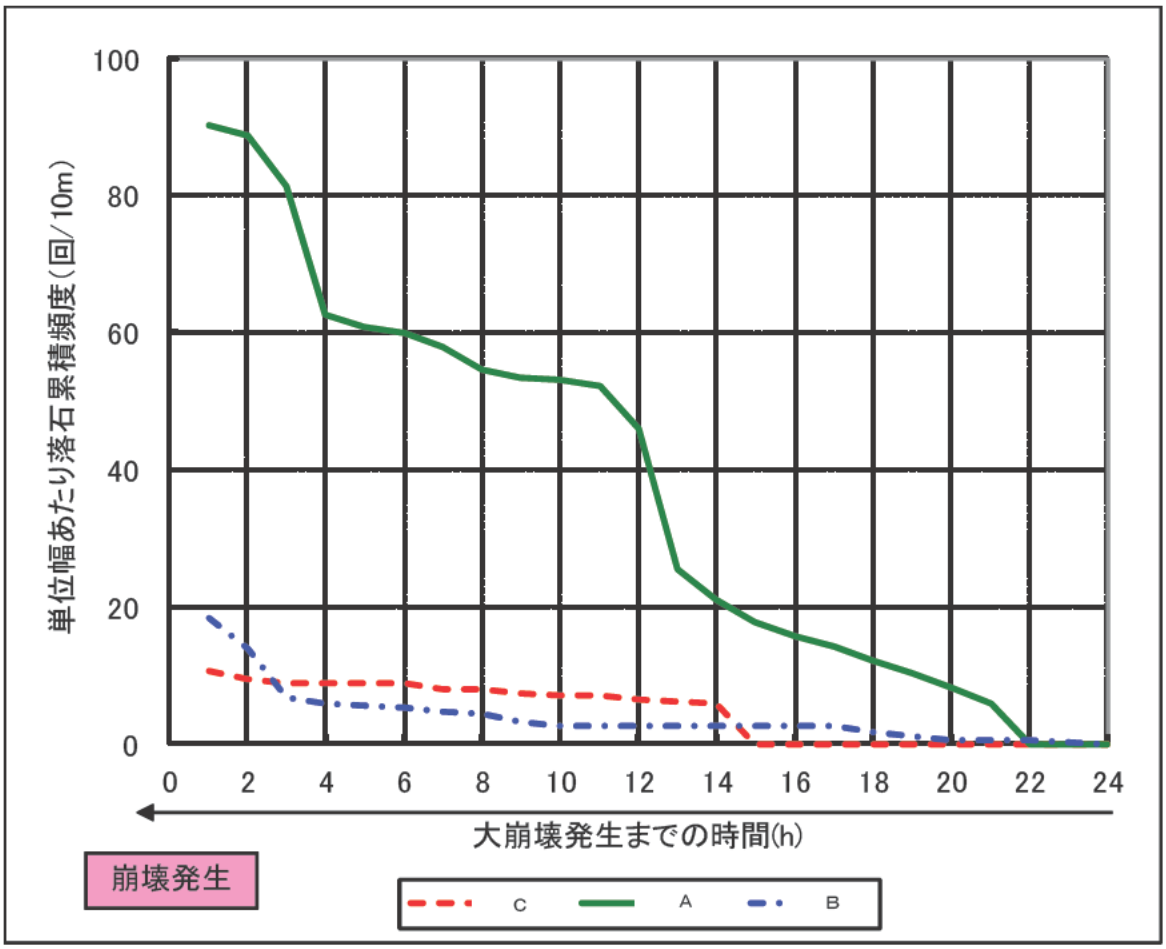


図 6.3　崩落発生前 24 時間の単位幅当たりの落石累積頻度

以下にグラフから読み取った特徴を列記する。

最も落石回数が多かったのは、A地区（90.1 回/10m）で、以下B地区（18.3 回/10m）、C地区（10.5 回/10m）であった。

各箇所の落石累積傾向の変化は以下のとおりであった。

A地区：21 時間前、13 時間前、4 時間前の 3 回にわたる累積傾向に変化が有る。

B地区：3 時間前に累積傾向の変化が有る。

C地区：崩落 15 時間前に急に増加する。

次に、落石頻度の変化など崩落発生前の前兆現象の特徴を確認するため、崩落発生前の 24 時間内に確認された落石回数を 100 とした場合の累積頻度（加積百分率）を比較した（図 6.4）。

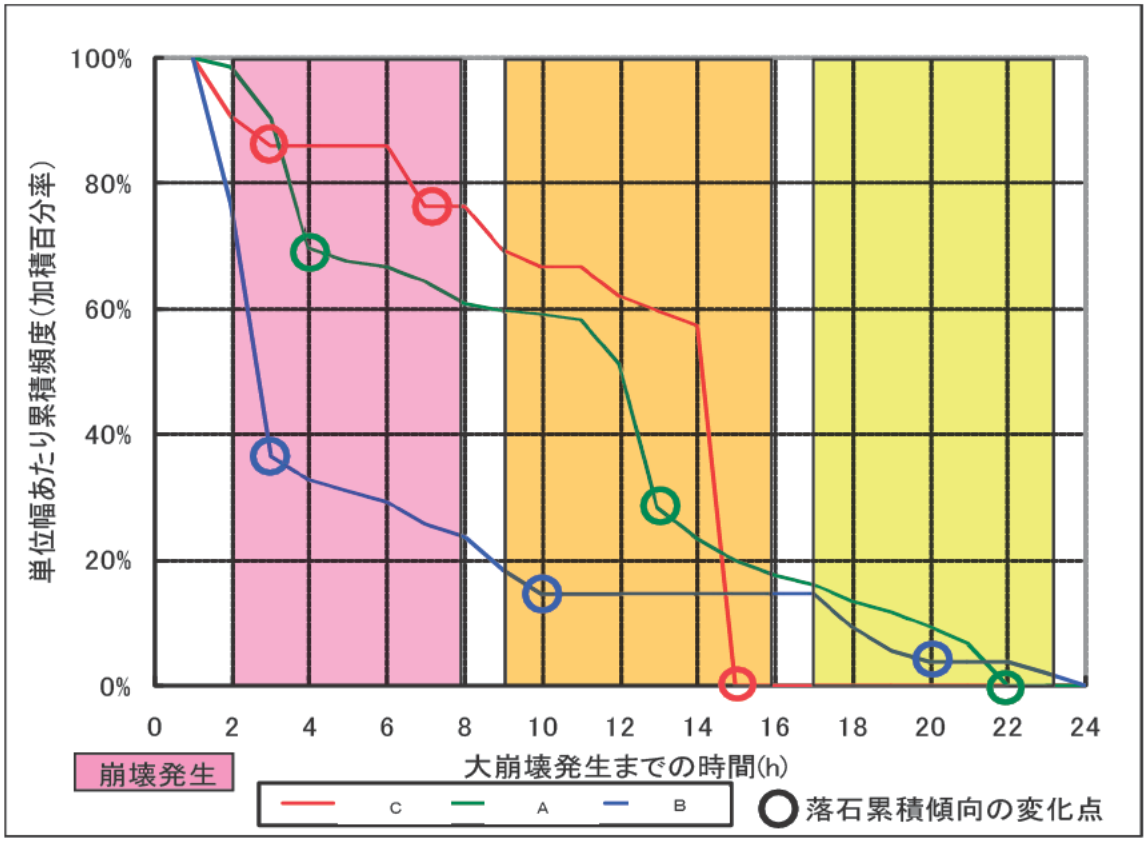


図 6.4　崩落発生前の落石累積頻度(加積百分率)

全ての事例において、崩落発生前の 24 時間以内に落石頻度の変化が認められる。

全ての事例において、落石累積傾向の変化が 3 回発生している。

落石発生傾向の変化の把握に最適となる目安値を検討するため、崩落発生前 24 時間内の落石累積数(図 6.5) を、ある時点から遡る一定の判定期間内の落石頻度として整理した。

一定時間をそれぞれ 1 時間、6 時間、12 時間、24 時間とし、この間に発生した落石累積数で整理した結果を図 6.6 に示す。

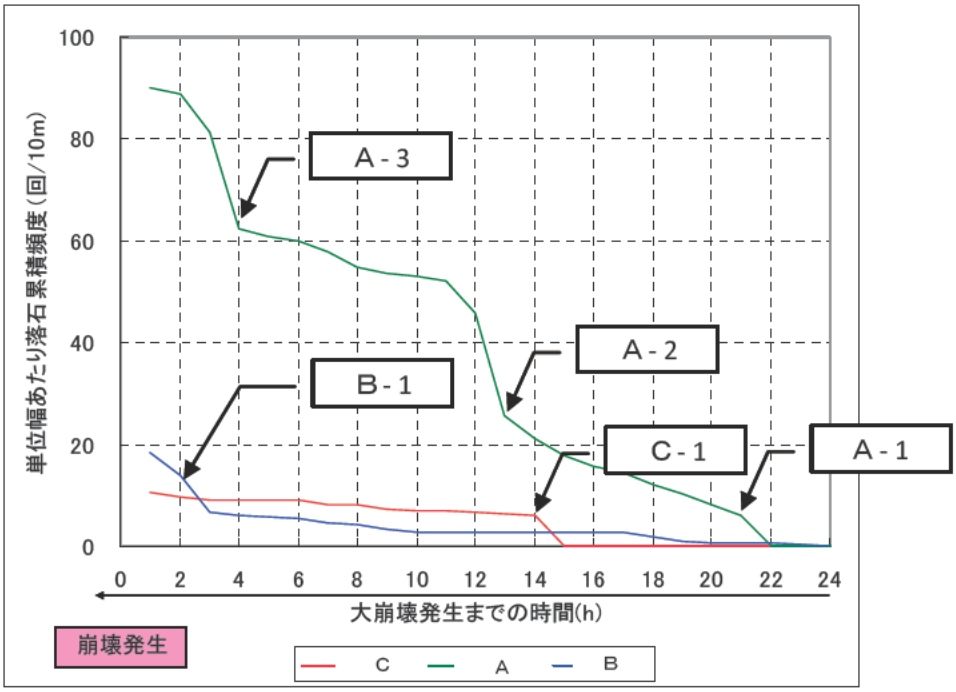


図 6.5　崩落発生前 24 時間累積落石数

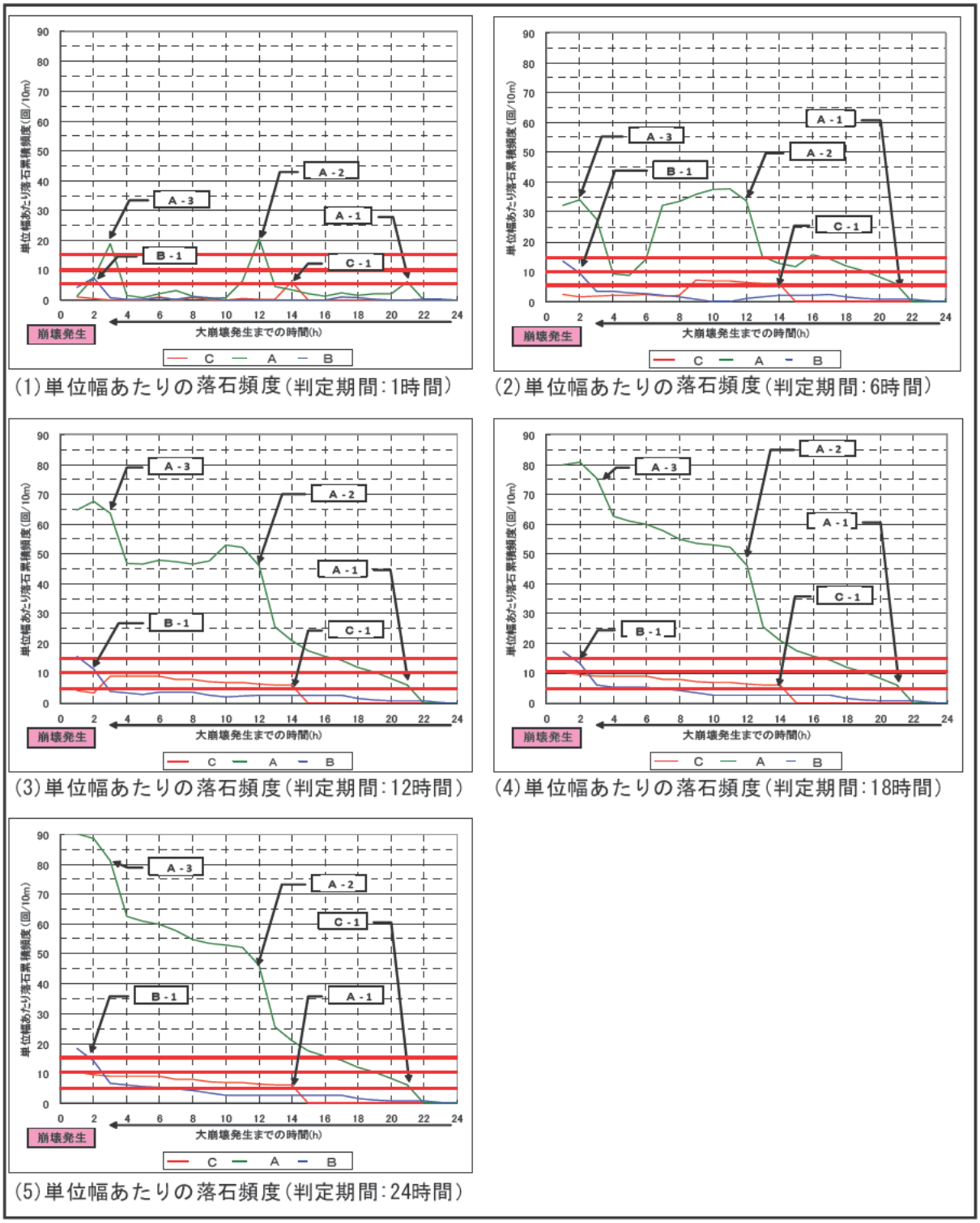


図 6.6　単位幅当たりの落石頻度

これによると、判定期間を短く設定するほど突発的な落石頻度の増加を捉えている。判定期間を 18 時間より長く設定すると、傾向は本来の累積図（図 6.5）とほとんど変わらない。

(3)　目安値の考え方（試案）

以上の結果から、**表 6.3** に示すとおり、複数の試案を設定した。特徴を以下に列記する。

・時間当たりの落石回数を多く設定すると崩落を検知しないケースがある。

・判定期間については長目に設定すると検知が早まるケースもある。

表 6.3　目安値の試案一覧

より出現頻度の低い条件

目安値（案） 落石回数/時間	個数	時間	検知から崩壊までの時間		
			C地区	A地区	B地区
10回/時間	10	1	検知なし	12時間前	検知なし
5回/時間	5	1	14時間前	21時間前	2時間前
10回/6時間	10	6	検知なし	19時間前	1時間前
5回/6時間	5	6	14時間前	20時間前	2時間前
15回/24時間	15	24	検知なし	16時間前	1時間前
10回/24時間	10	24	1時間前	19時間前	2時間前
5回/24時間	5	24	14時間前	21時間前	6時間前

個別の特徴は以下の通りである。

Ａ地区：落石回数、判定期間の設定にかかわらず検知する。

Ｂ地区：判定期間や落石個数の設定を変化させても、基本的に検知から崩落までの時間は短い。

Ｃ地区：判定期間を長くしても検知時間に変化はない。落石の回数を多く設定すると、崩落発生を検知しないケースがある。

(4)　目安値による崩落予測の課題

実際の崩落に至った事例のみを対象にした検討結果であり、この目安値を超過した後に崩落したことは事実であるが、超過した場合に必ず崩落する、あるいは崩落する可能性が高い、と断定できる性格のものではないことに注意が必要である。むしろ自然状態で発生する落石傾向から逸脱する状態になったことを把握するための目安値として設定することが重要で、その妥当性については各現場での実際の発生頻度を確認する必要がある。

また、本検討における落石数は、実運用時に想定される防護柵への衝突回数ではなく、移動体

の変動に伴って発生が目撃された落石数であることにも注意が必要である。

このほか、目安値を使用した崩落予知に関する課題を**図 6.7** に示す。一部は検討の前提条件と重複するが、本システムは仮設防護柵を検知の媒体としていることを認識する必要がある。

課題への対応の方向性は、現地確認時及び目安値設定時の留意点として後述する。

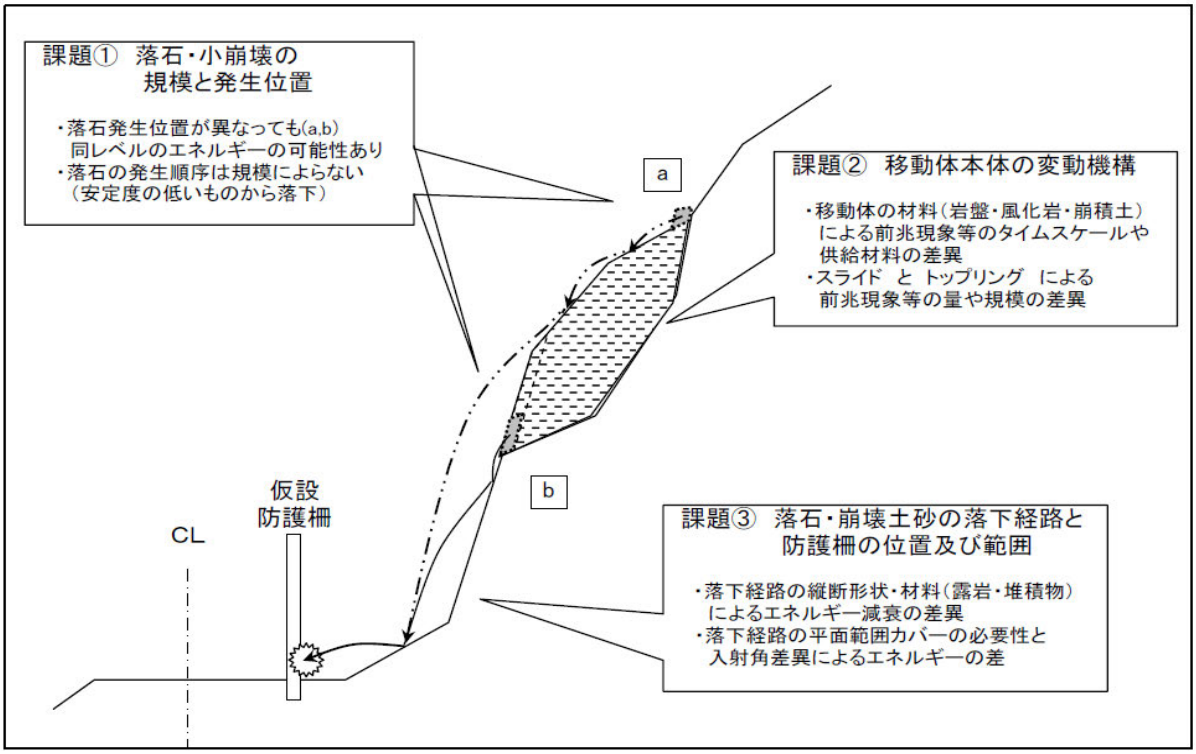


図 6.7　落石検知による崩落等発生予測の課題

6.2.3　長期検証実験箇所での事例分析

(1)　目的及び分析の着目点

6.2.2 の事例で設定した目安値の適用性を確認し、現場での実際の設定・運用に向けた課題を抽出するために検証実験箇所でのデータ分析を行った。

具体的には現地における以下のデータの特徴に着目した。

- 落石以外の原因による取得データの有無
- 仮設防護柵の機能に影響を与える規模の落石の有無
- 常時の斜面状況（落石の発生頻度及びその変動状況）
- 落石による衝突データの特徴

(2)　現地条件の整理

検証実験箇所は、栃木県日光市足尾町に位置する国土交通省関東地方整備局渡良瀬川河川事務所　砂防事業エリア内の松木川左岸側斜面であり、松木川に合流する枝沢左岸側の西向き斜面である。遷急線までの比高が約 25m で、全体として浅い沢型地形を呈する（**写真 6.1**）。

写真 6.1　現地全景

(3)　現地状況から推定される斜面変動形態

現地では、風化の進行した岩盤斜面表層からの小落石が頻発しており、斜面上では数 10ｃｍオーダー以上の浮き石化した岩塊も確認される。ただし、大規模な岩盤崩壊や地すべりの痕跡は認められない。

落石は沢状地沿いの経路に集中して分布し、今回設置した仮設防護柵のポケット内で小規模なコーンを形成している（**写真 6.2**）。

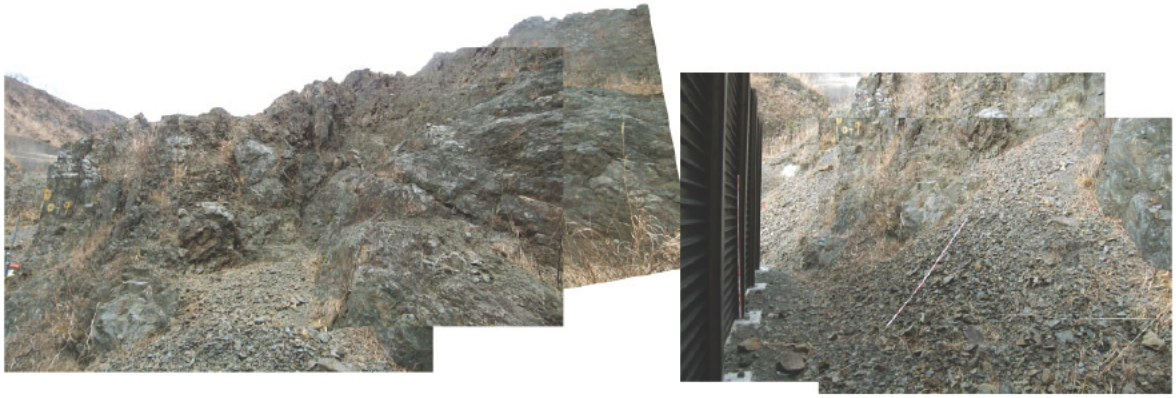


写真 6.2　現地での落石発生状況とポケットの状態

(4)　落石データの特徴

① 落石以外のデータとの分離

現地では、２種類のセンサー（加速度型センサー、速度型センサー）が導入され、それぞれ現場での衝突試験結果を加味したフィルター処理等で落石以外のデータとの分離が行われ、カメラによる確認も実施された。この結果、部分的な欠測等はあるものの、落石の発生状況とその変化が把握されている。

② 仮設防護柵の機能に影響を与える規模の落石の有無

各システムで検知範囲の上限を超過する落石の発生が確認された。3/7 に発生したイベントは今回の試験中に仮設防護柵に衝突した落石エネルギーが最大級で、柵のほぼ最下段への衝突であったが仮設防護柵の横材に変形が発生した。

このほか、落石の規模を表現する方法として加速度振幅の評価や、振動エネルギー（最大速度振幅×継続時間）の概念を導入した評価の試みがなされた。いずれも落石の規模や防護柵の能力を評価する指標として活用が期待される。

③ 落石検知状況の概要

今回の長期実証実験では速度型・加速度型２種類のセンサーを使用し、それぞれ事前基礎実験をもとにイベントを検知するしきい値を設定して落石検知を実施した。2011 年２月下旬から４月上旬にかけての落石検知状況を図 6.8 に示す。

しきい値の設定状況によって、グラフ B(加速度型センサー)の同期間内の累積検知回数は、グラフ A(速度型センサー)の約２倍に達している。ただし累積グラフの傾向をみると 3/10 までの累加傾向、その後 3/25 までの比較的検知数の少ない時期、3/26～4/2 の累加傾向と、双方よく一致しており、しきい値の設定はそれぞれ妥当であったと考える。

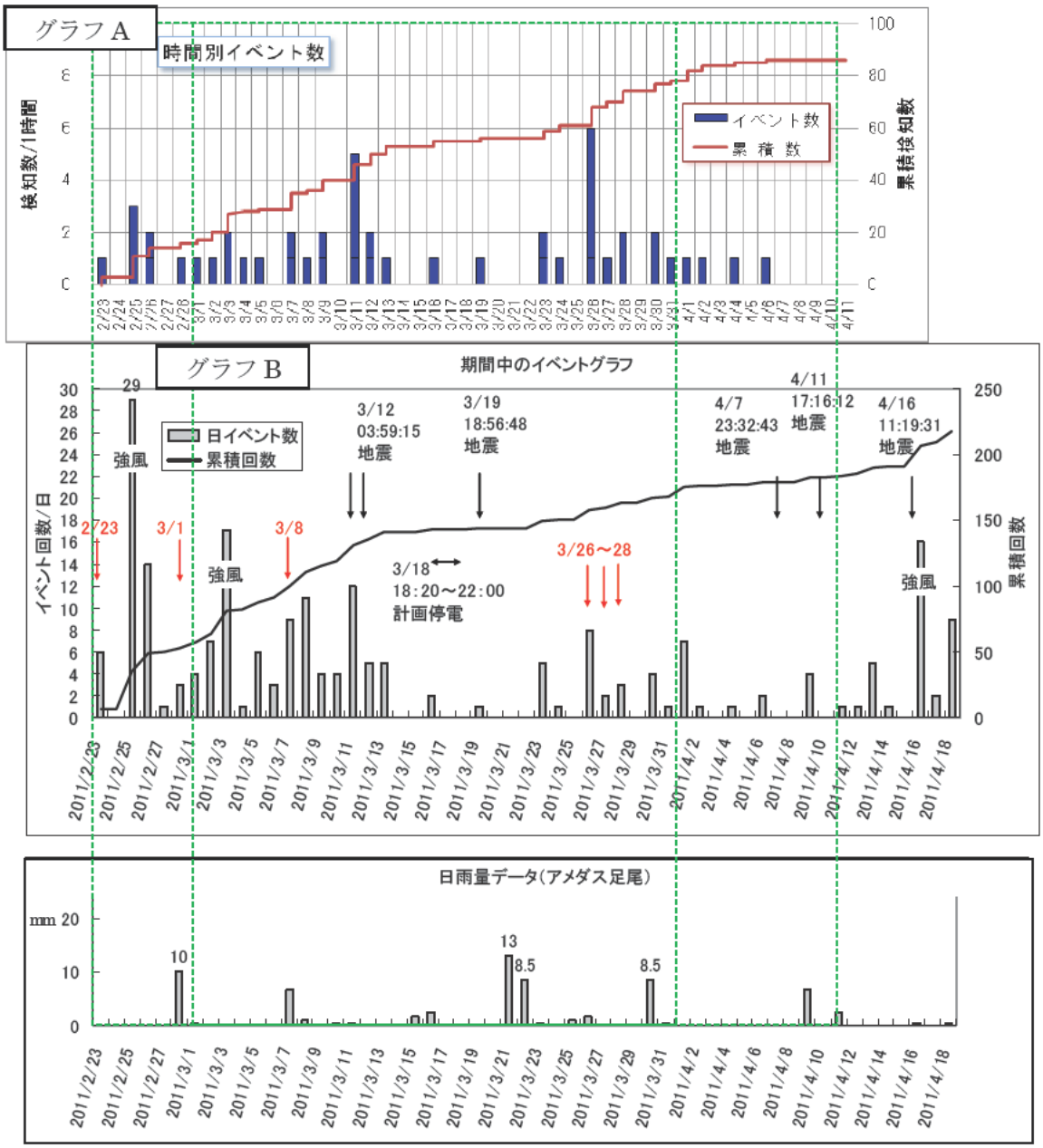


図 6.8 ２種類のセンサーによる落石検知状況（A：速度型センサー、B：加速度型センサー）

傾向には大きな差が無いため、ここでは検知数の多い加速度型センサーのデータを用いて、落石イベント発生状況の概要を以下のとおり整理した。詳細は5章に示したとおりである。

表 6.4　観測結果一覧表(加速度センサー)

イベント総数(回)	208
観測開始日	2011/2/23
観測終了日	2011/4/18
観測日数	54
1日の平均落石イベント数(回)	3.9

※イベントの定義はセンサーが感知した一度に崩落する落石とする。

	有り	無し	合計
カメラ画像有無	147	61	208
	70.7%	29.3%	100.0%

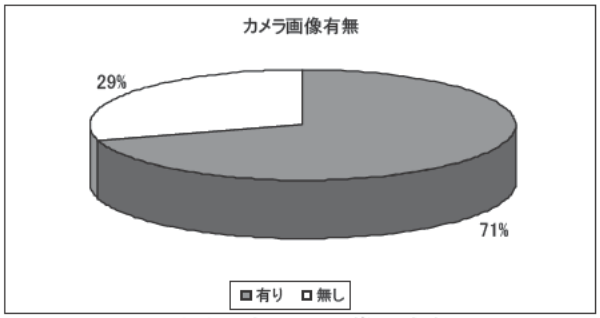


図 6.9　カメラ画像の有無

	有り	無し	合計
カメラ音声有無	171	37	208
	82.2%	17.8%	100.0%

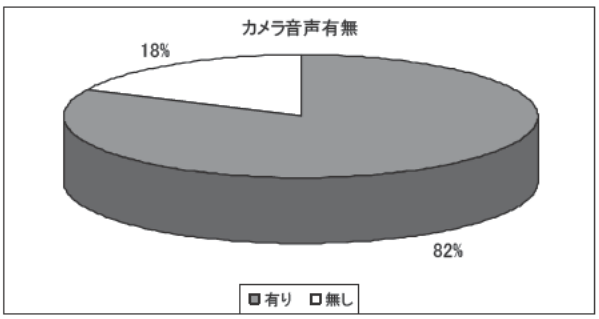


図 6.10　カメラ音声の有無

④ データの特徴

データから判断される落石のタイプは、全体の 55.3%が複数タイプであった。単発タイプは 36.1%である。

	単発	複数	不明	合計
落石タイプ	75	115	18	208
	36.1%	55.3%	8.7%	100.0%

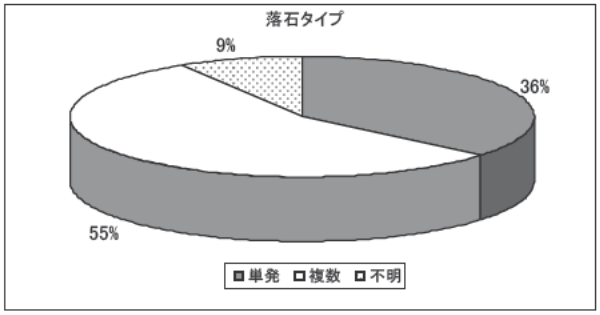


図 6.11　落石タイプ

カメラ等から確認される落石のおおよその個数は 5 個以下の件数が 68 イベント（全体の 32.7%）と最も多い。10 個以上は 54 イベント（26.0%）、5～10 個は 31 イベント（14.9%）であった。仮設防護柵衝突時の落石個数は、落下後転動中に分離したものも含むため、個数にこだわらずイベントとしての処理が妥当と判断できる。

	5個以下	5個～10個	10個以上	不明	合計
落石個数	68	31	54	55	208
	32.7%	14.9%	26.0%	26.4%	100.0%

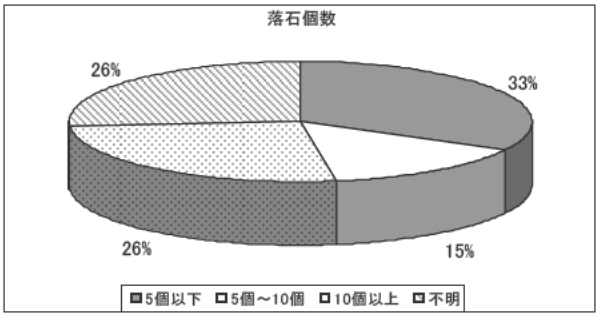


図 6.12　落石個数

カメラから確認できる最大礫径は、全体の 66.3%（138 イベント）がφ5cm 以下の比較的小さい礫が主体であった。一方で、径が大きい礫についてもφ20cm 程度の礫が 14 イベント（6.7%）、φ30cm が 2 イベント（1.0%）、φ50cm が 2 イベント（1.0%）確認されている。

	φ5以下	5	10	20	30	50	不明	合計
最大礫径	138	9	19	14	2	2	24	208
	66.3%	4.3%	9.1%	6.7%	1.0%	1.0%	11.5%	100.0%

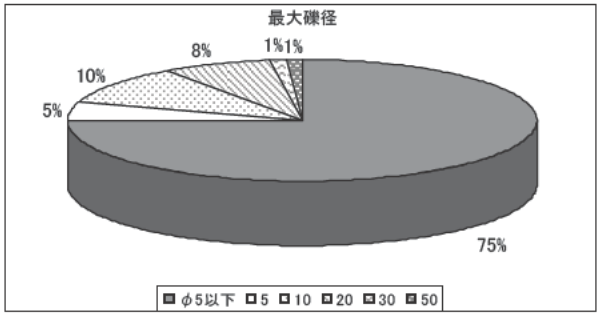


図 6.13　最大礫径

全体の落石イベントのうち 81.7%（98 イベント）が仮設防護柵に到達している。一方で、防護柵に到達していないイベントは 18.3%（22 イベント）確認されている。仮設防護柵の設置位置によってはポケットのサイズにより落石を検知できないおそれがあることに留意が必要である。

	到達	未到達	合計
到達の有無	98	22	120
	81.7%	18.3%	100.0%

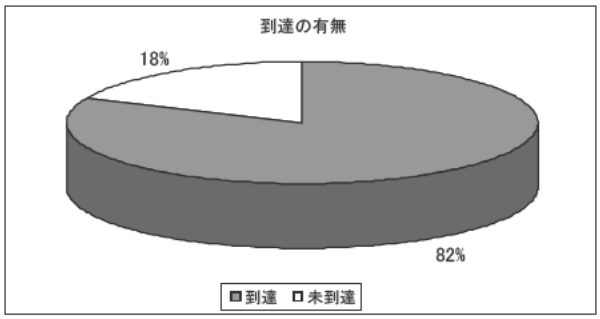


図 6.14　到達の有無

スパンの位置は山側に向かって図 6.15 に示すとおりである。

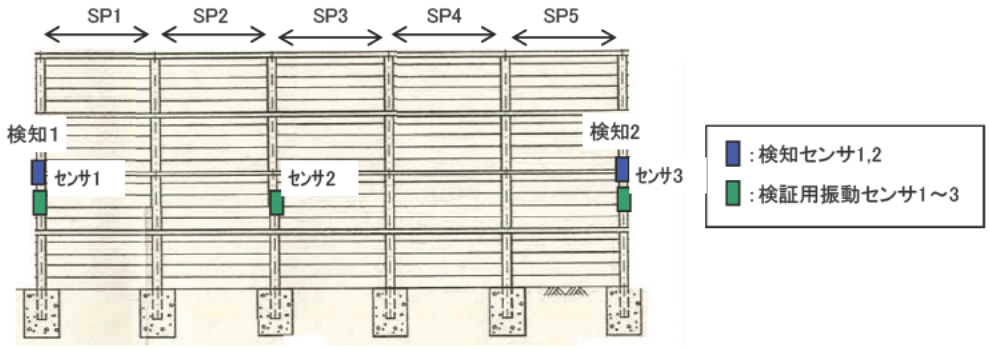


図 6.15　スパンとセンサーの位置関係

センサーが感知する最初の打撃位置は、仮設防護柵の中心であるスパン 3 における検知が 31 イベント(18.3%)と最も多い。次いでスパン 1 の 27 イベント(16.0%)となっている。

	スパン1	スパン2	スパン3	スパン4	スパン5	不明	合計
最初の打撃	27	21	31	19	15	56	169
	16.0%	12.4%	18.3%	11.2%	8.9%	33.1%	100.0%

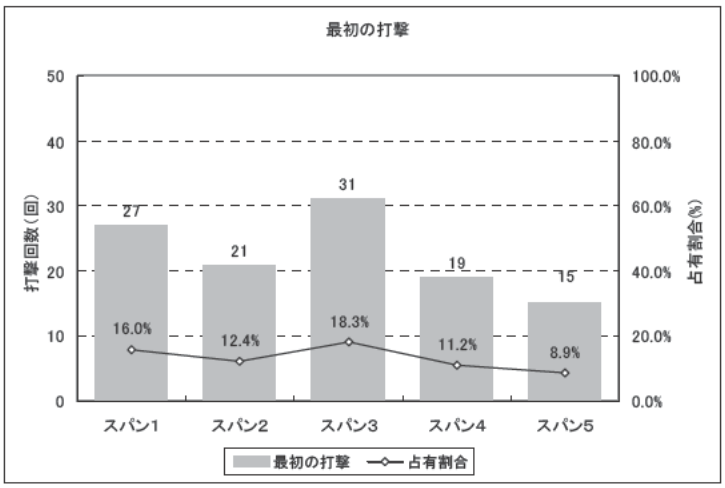


図 6.16　最初の打撃箇所

各センサーが検知した打撃のイベント数は、スパン 3 が 72 イベント(28.5%)と最も多い。次いでスパン 2、スパン 1 が多い傾向がある。スパン 3 は崖錐の先端に位置しており、落石イベントが相対的に多いものと考えられる。センサー設置の際は、地形を踏まえた落石の特性を考慮することが望ましい。

	スパン1	スパン2	スパン3	スパン4	スパン5	合計
打撃スパン	42	56	72	44	39	253
	16.6%	22.1%	28.5%	17.4%	15.4%	100.0%

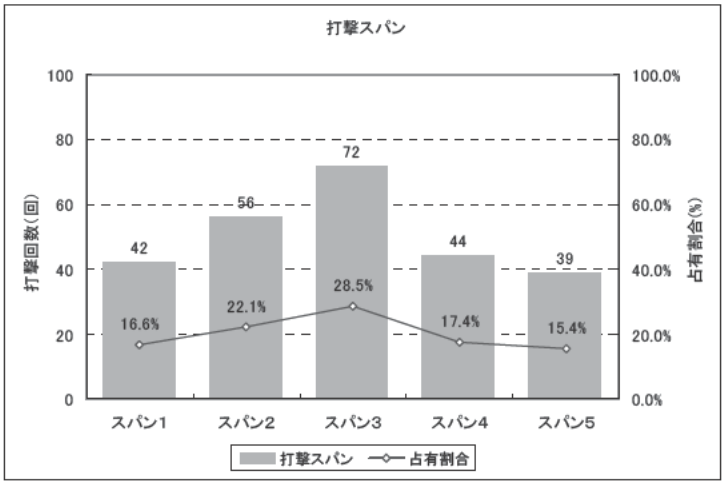


図 6.17　打撃スパンの位置

※加速度センサーによる検知

⑤ 計測期間中の発生頻度の変化

現地で計測された落石イベント発生頻度の推移を図 6.18 に示す。データは速度型センサーの検知結果を用いた。

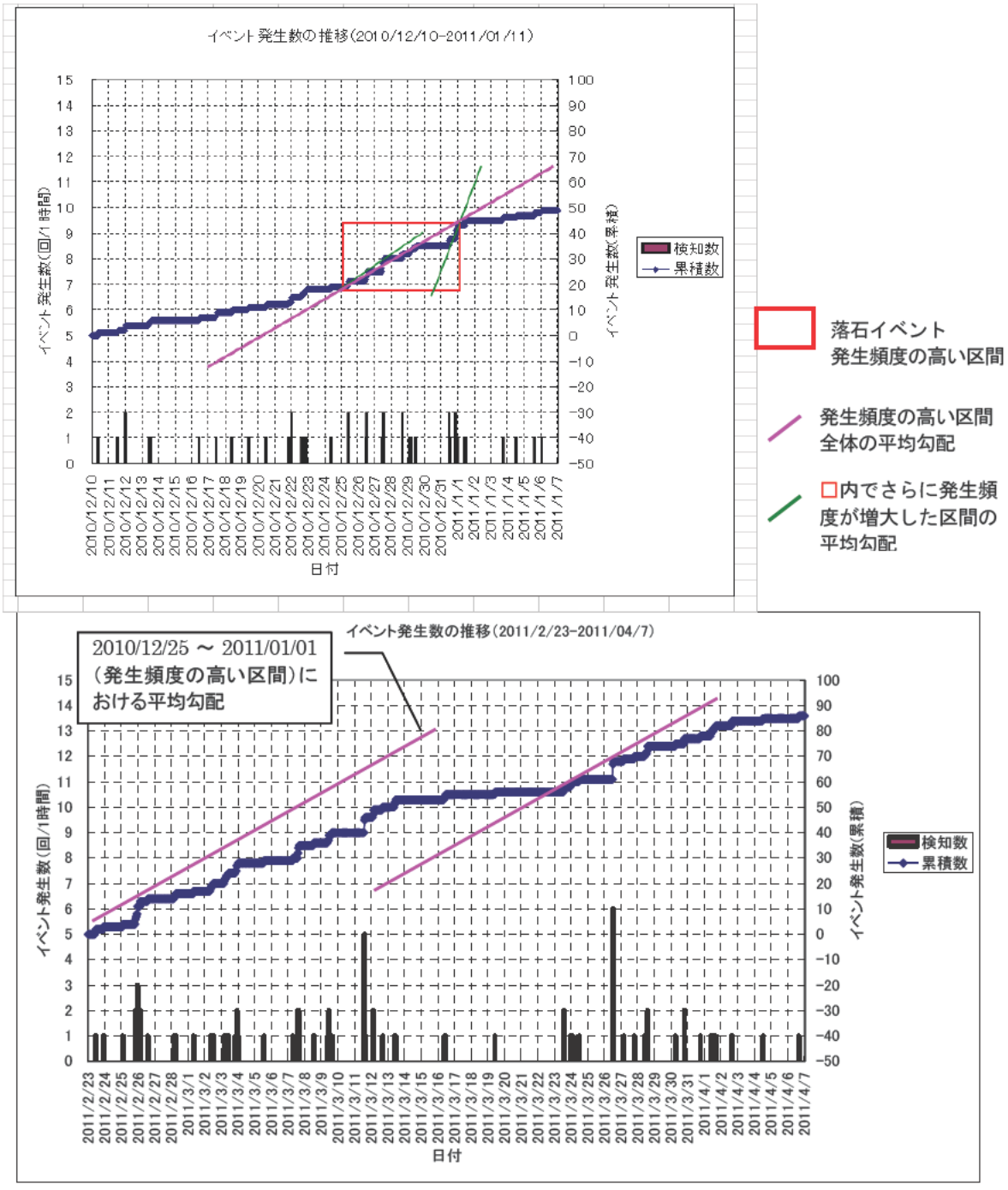


図 6.18　イベント発生頻度の推移

これによると、落石イベントの頻度にある程度期間的な変化があることが分かる。大局的にはおおむね一定の頻度でイベントが発生する期間と、これに対して相対的に頻度の高い期間、逆に頻度の低い期間である。

停電前の 2010/12/25～2011/01/01 は発生頻度の高い期間に相当し、後述の目安値設定手順の検討時にはこの期間に着目した。

これらの変化の原因は今回の実験では特定されていないが、地山の基底変動的な動きを反映している可能性があり、斜面変動の前兆現象をとらえるためのデータとして目安値設定の材料とする。

6.3　目安値の提案

6.3.1　設定の手順

今回は、長期実証試験における計測開始から約１ヶ月の現場データを用い、崩落発生事例を基に設定した２種類の目安値も参考に、定常状態を逸脱した可能性のある落石データを抽出するための目安値の設定を行った。

本システムの現場での実運用を念頭に、目安値を設定するための手順を図 6.19 に示す。

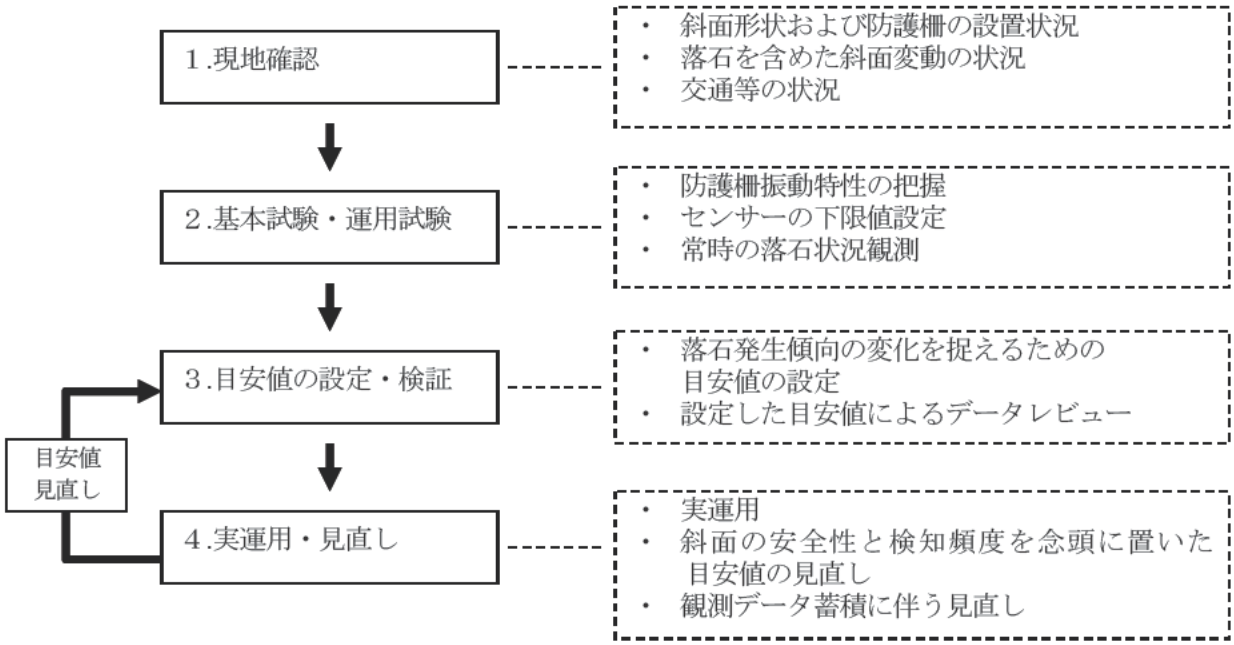


図 6.19　目安値設定の手順

6.3.2　現地確認

本システムの運用に先立って、計測器を設置する仮設防護柵、落石が想定される斜面、落石や崩落によって被災のおそれのある道路周辺の状況等を現地で確認する必要がある。

確認の基本的な項目を以下に示す。

ⅰ）斜面形状及び仮設防護柵の設置状況

・斜面　：形状及び高さ

・仮設防護柵：設置範囲・方向・高さ、ポケットの状況、設置状況

ⅱ）落石を含めた斜面変動の状況

・落石等：表層の風化・緩み状況、既往落石の規模・発生位置、量、到達範囲、落下経路

ⅲ）その他

・交通の状況　：交通量、幅員、片側通行のシステム、転回場や退避場の位置

・監視関連情報：監視（目視）に適した場所の有無、電源の有無・位置、照明の有無・位置、他の監視システムの有無・配置　等

この時点での確認の主眼は、仮設防護柵が安全に機能しうる状態にあるか否かである。仮設防護柵機能を上回る落石の頻発や、地表現象等から大規模な斜面変動の発生徴候が認識された場合は、実際の状況に応じた応急対策や、伸縮計など本システム以外の計測器も含めた監視体制の再構築が必要である。

また、確認時点で斜面変動の徴候は無いものの、仮設防護柵の設置状況や斜面形状・既往落石の発生状況から通行者に危険が及ぶおそれがあると判断された場合もシステム運用前に対応が必要である。

具体的には表 6.5 のような事項に十分注意する必要がある。

表 6.5　現地確認のポイント

区　分	着 目 点	確　認　内　容	要 確 認 ポ イ ン ト
仮設 防護柵の 設置要件	小規模な 飛石・落石の 防護機能	標準的な材料・規格の採用 →①	・発生範囲に対する十分な設置延長 ・支柱・板材の材料と規格・寸法 ・根入れ長 ・特殊な設計条件の有無 ・設置方法（根入れ部の処理、固定の方法、配置等）
斜面 変動の タイプ等	想定される 落石	発生位置・規模(エネルギー) →②	・浮き石・転石の分布位置（斜面上及び既往落石） ・浮き石・転石の規模及び形状（斜面上及び既往落石） ・発生頻度（落石衝突痕の分布範囲・数量、崖錐・落石錐表層の安定度）
		落下経路 →③⑤	・沢状地の有無・分布状況及び植生の状況 ・凹凸の大小や分布（異常跳躍の可能性） ・崖錐・落石錐の形状・伸長方向
		落石材料・形状 →④	・単位体積重量 ・岩質 ・円摩度
		既設対策 →④	・落石の発生・転動あるいは防護柵への衝突を抑制するような法面保護工等の有無
	岩盤崩壊・ 地すべり等の 大規模な 斜面変動 兆候	変動タイプ →⑥	・周辺斜面を含めた既往の変動履歴（タイプ・規模・頻度） ・地形地質特性から現状で想定される変動形態
		現況の活動性・安定度 →⑥	・変動微地形の種別・規模・方向性と新旧 ・地表変状の種別・規模・方向性・新旧 ・現状の変動監視体制（監視手法と配置）
地形 地質と 防護柵 配置	柵高	想定落石跳躍高との比較 →③	・地形からみた設置位置周辺での想定跳躍高 ・既設柵もしくは路面への衝突痕の有無・位置
	防護柵への 想定衝突形態	柵への想定衝突方向・位置 →④	・既設柵に対する擦過痕の位置・方向 ・落石経路の形状による想定衝突位置の制約の有無
		柵背後のポケット →⑤	・崖錐・落石錐の規模・形状及び防護柵との離隔 ・ポケットの形状及び容量 ・サンドクッション等の有無・規模 ・既往の小崩壊発生事例（規模及び到達範囲）

①仮設防護柵の設置状況の確認

本来仮設防護柵には小規模な落石や飛石の防護機能のみが期待されている。本システムのセンサーはこうした仮設防護柵に設置する仕様であり、現地の長期実証試験もこうした仮設防護柵を対象に実施している。このため、センサーを設置する仮設防護柵の具体的な設置状況（設置延長、規格・寸法、根入れ長、支柱・横材の固定方法等）が一般的であることを確認する。一般的でない場合は、基本試験の実施で対応が可能か等の確認を行う。

②仮設防護柵機能を超過する落石有無の確認

本来仮設防護柵には小規模な落石や飛石の防護機能のみが期待されている。規模や斜面上の分布位置により、仮設防護柵の機能を明らかに超過するエネルギーを持つ不安定な浮き石等については、安定度を確認のうえ除去等の必要な対応を検討する。

③仮設防護柵の規模・範囲の確認

落石発生箇所下方の地形条件によっては、凹地沿いに落石の転動経路が限定される場合や、局所的に大きな跳躍高が発生する場合がある。設置範囲が不足する場合には必要な対応をとる。

④落石検知の正確性の確認

岩質・形状によっては、同程度の規模(体積)の落石であっても仮設防護柵に衝突する際のエネルギーが大きく異なることが想定される。また、斜面形状等によって、落石の大半が防護柵の壁面に正対する方向から大きくずれて衝突することが予想される場合がある。この際にも、検知されるエネルギーが落石規模を正確に反映しないことが想定される。こうした特殊な条件下の現場では、基本試験時に必要に応じて現場の落石を利用したケースや壁面に対して斜交する方向からの衝突ケースも加え、しきい値の設定や落石イベント解析の際の参考とする。一方、既設対策が部分的に施工されている斜面では、検知の対象とする落石が仮設防護柵に到達しないケースも想定され、注意を要する。

⑤適用範囲外の外力等の確認

落石や小崩壊が頻発し、落石錐が短時間に形成されるような箇所、あるいは明瞭な落石錐がすでに形成されているような箇所では、防護柵山側のポケット容量が短時間内に失われ、仮設防護柵への適用範囲外の土圧の作用や、柵の上部への落石衝突によって仮設防護柵が破損することが想定される。このような場合は崩土除去によるポケット容量の確保等、別途必要な対応をとる。

⑥大規模斜面変動の兆候の確認

仮設防護柵の機能を上回る斜面変動の兆候が明らかな場合には本システム単独での適用は行わない。特に最近の活動兆候が明瞭に確認される場合には、応急対策を含め必要な対応をとる。また、トップリングや剥離性崩壊のように、斜面変動のタイプによっては地山と移動体の接地面積が小さく、随伴現象の頻度が相対的に小さいことが予想され、注意を要する。

6.3.3　基本試験・運用試験

検知に使用するセンサーは速度型センサー、加速度型センサー共に現地に設置した仮設防護柵の特性に合わせた補正が必要である。そのため、３章で示した鉄球等を用いた基本試験を実施する。また、交通振動などのノイズは、設置場所によって多種多様の波形が生じることが想定されることから、運用を行いながら調整を実施することが望ましい。

基本的な確認事項を以下に示す。

ⅰ）仮設防護柵上でのセンサー感度の確認

・仮設防護柵の様々な箇所において衝突試験を行い、センサーが感度を有する範囲の広がりと特性を確認する。

ⅱ）センサーの検知範囲の設定

・検知の頻度、落石の特徴を考慮して設定する。

・ある程度の期間を設け観測する。

ⅲ）ノイズ

・交通振動など発生が予想される振動の大きさや頻度等を確認する。

・必要に応じてある程度の期間を設け観測する。

また、センサー以外の方法でも落石の実態を把握する場合は、カメラ（マイク）等による監視を併用することが望ましい。

6.3.4　目安値の設定・検証

(1)　目安値設定の考え方

前兆現象の見落としが無いよう、6.2.2 の崩落事例で設定した際と同様に、ある時点から遡る判定期間を設け、判定期間と落石頻度の組み合せによって前兆検知のための目安値を設定する。

通常、落石は個々の浮石、転石の存在状況（安定性）がランダムであるため、落石が分布する位置や落石の大きさにはよらず、外的要因の変化によって安定性を保持できなくなったものから落下すると考えられる（図 6.20）。

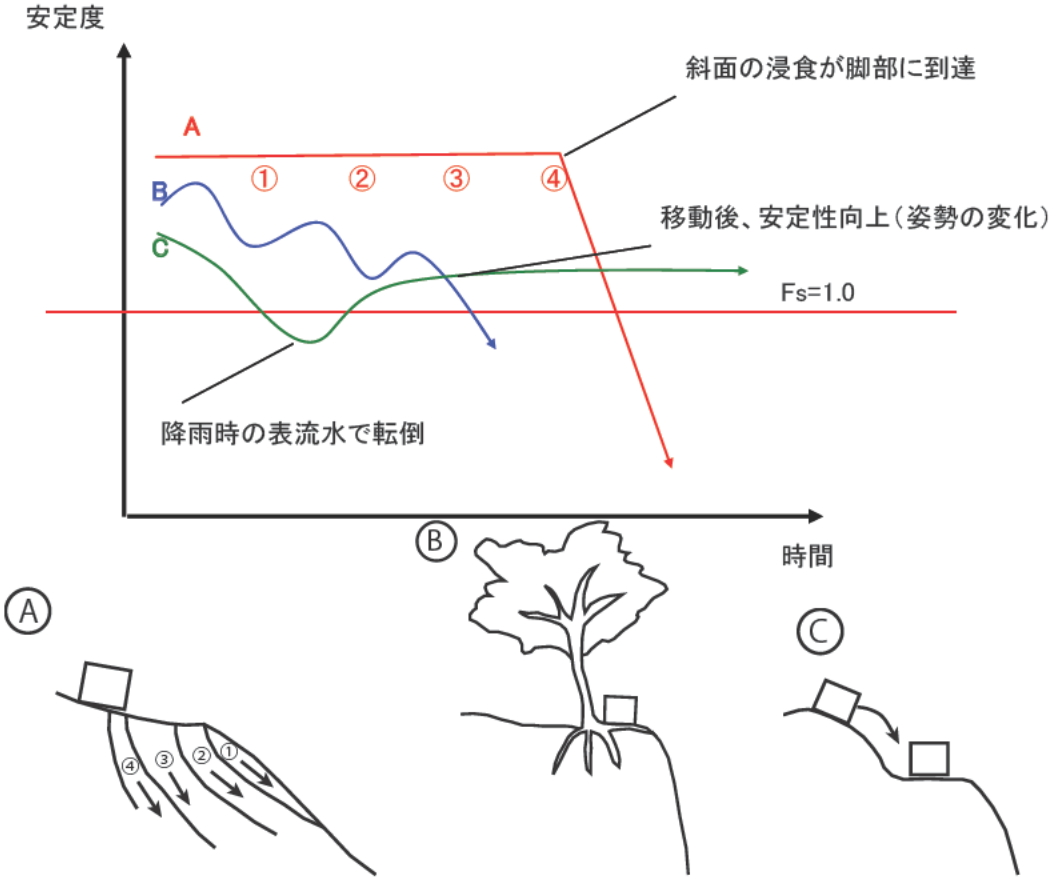


図 6.20　外的要因の変化による落石発生のイメージ

しかし、浮石・転石が分布する斜面の一定範囲内に大きな外的要因の変化があった場合は、この範囲内の浮き石・転石の安定性が低下し、多くの落石が発生する可能性がある。

この「大きな外的要因の変化」は、通常の斜面では気象や季節の変化によって発生し、斜面全体が影響を受けるが、地すべりやクリープ等の斜面変動が発生すると、移動体の周辺(特に外周部)の浮き石や転石がその運動機構によって大きな影響を受けると考えられる。この結果、発生する落石頻度の増加を斜面変動の前兆現象として検出するため、以下の手順で「目安値」を設定する。

目安値①　　通常の状態での落石発生傾向からの逸脱

目安値②　　特定範囲での比較的短期間内での落石頻度変化（増加）

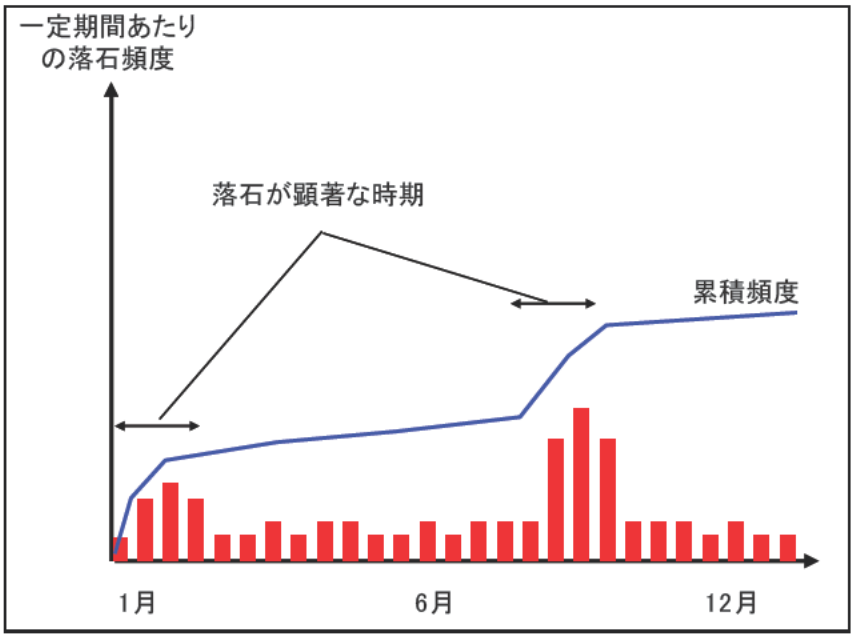


図 6.21　通常状態での落石頻度とその傾向からの逸脱イメージ

①については、年間を通じた落石傾向を概観し、落石が活発な期間における発生頻度を把握しておき、2～3 日ないし 1 週間程度のスパンで通常状態からの逸脱を検知しようとするものである（図 6.21）。

②については、斜面変動が活発化した場合、落石頻度が通常より高くなることを念頭に、数時間内の単位時間あたりの落石発生頻度が急増する傾向を検知するものである。

これとは別に、規模(エネルギー)の大きな落石は、通行者に直接被害を与えるおそれがあるため、仮設防護柵の機能を明らかに超過すると判定された時点で撤去等の必要な対応を検討する必要があると考える。

(2)　長期検証実験結果による目安値の設定

長期検証実験の結果を使用して目安値を設定した。使用した具体データを図 6.22 に示す。

1）手順

設定は以下の手順で行った。

①落石が顕著な期間の抽出
↓
②定常状態からの逸脱傾向を把握するための目安値の設定
↓
③急激な頻度増加を把握するための目安値の設定
↓
④データレビュー

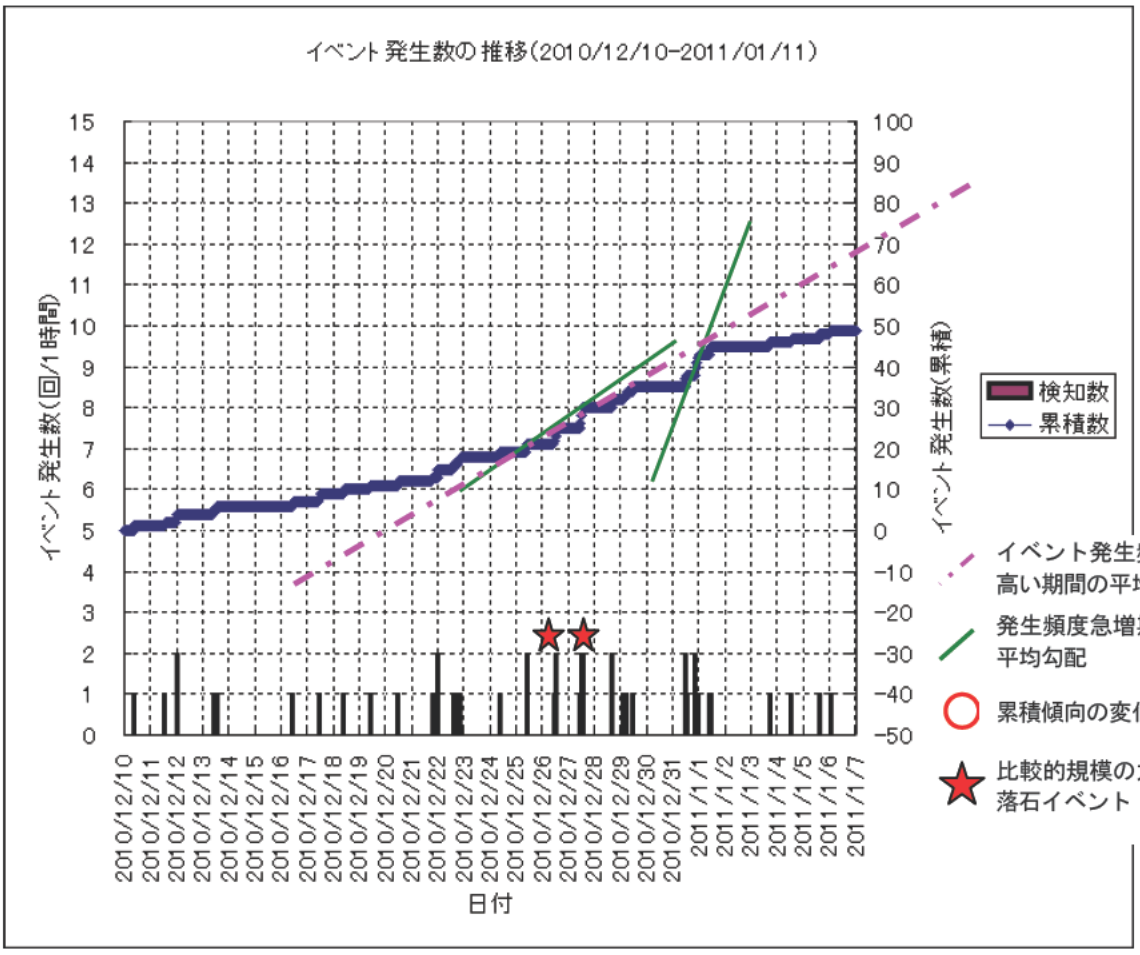


図 6.22　目安値の設定対象データ

2）落石が顕著な期間の抽出

設定対象データの約１ヶ月間内は大きく３期に区分され、中間の 12/25～1/1 の間は、前後の期間より明らかに発生頻度が高く（累積曲線の勾配が大きい）、大規模な斜面崩落に伴う落石の累積事例のように、明瞭な累積傾向の変化点（緑の直線と交差）が認められる。

また、個々の落石の規模は今回考慮していないが、比較的規模の大きい２回の落石イベントもこの期間内に検知されている。

3）定常状態からの逸脱傾向を把握するための目安値の設定

前述の通り、落石イベントのデータにおける目安値は、移動体の変動速度に相当する「一定時間あたりの落石イベント頻度」として設定する。これは次項に示す急激な頻度の増加を把握するための目安値も同様であり、分母となる「現在から遡る一定時間」を複数検討し、該当箇所の実際の落石頻度に応じた設定を行う。

対象期間の落石イベント頻度を、一定時間を 6 時間、12 時間、24 時間として整理した結果を図 6.23 中段のグラフに示す。

ここで、図 6.23 の~~赤~~枠の区間（12/25-1/1）は、上段グラフで前後より曲線の平均勾配が大きく、当該斜面で落石が通常よりも高い頻度で発生した期間である。

この期間に対して中段グラフの要素で目安値を検討する。

１週間程度の変化であるため、12 時間、ないし 24 時間あたりの頻度が有効であり、設定には主に以下の２つの方向性がある。

第一は、期間内の最大の累積傾向発生時においても懸念される変動がなかったことを評価するもので、例えば中段グラフの a 付近に着目し、24 時間あたり 7 ないし 10 の頻度の出現を今後の警戒の目安とするものである（グラフ中 ○ 範囲）。

第二は 24 時間あたりの頻度のうち中段グラフの b 付近に着目し、4 あるいは 5 の状態が継続することを今後の警戒の目安とするものである。

ここでは前者を採用し、24 時間あたり 8 回を目安値として後述のデータレビューを行う。

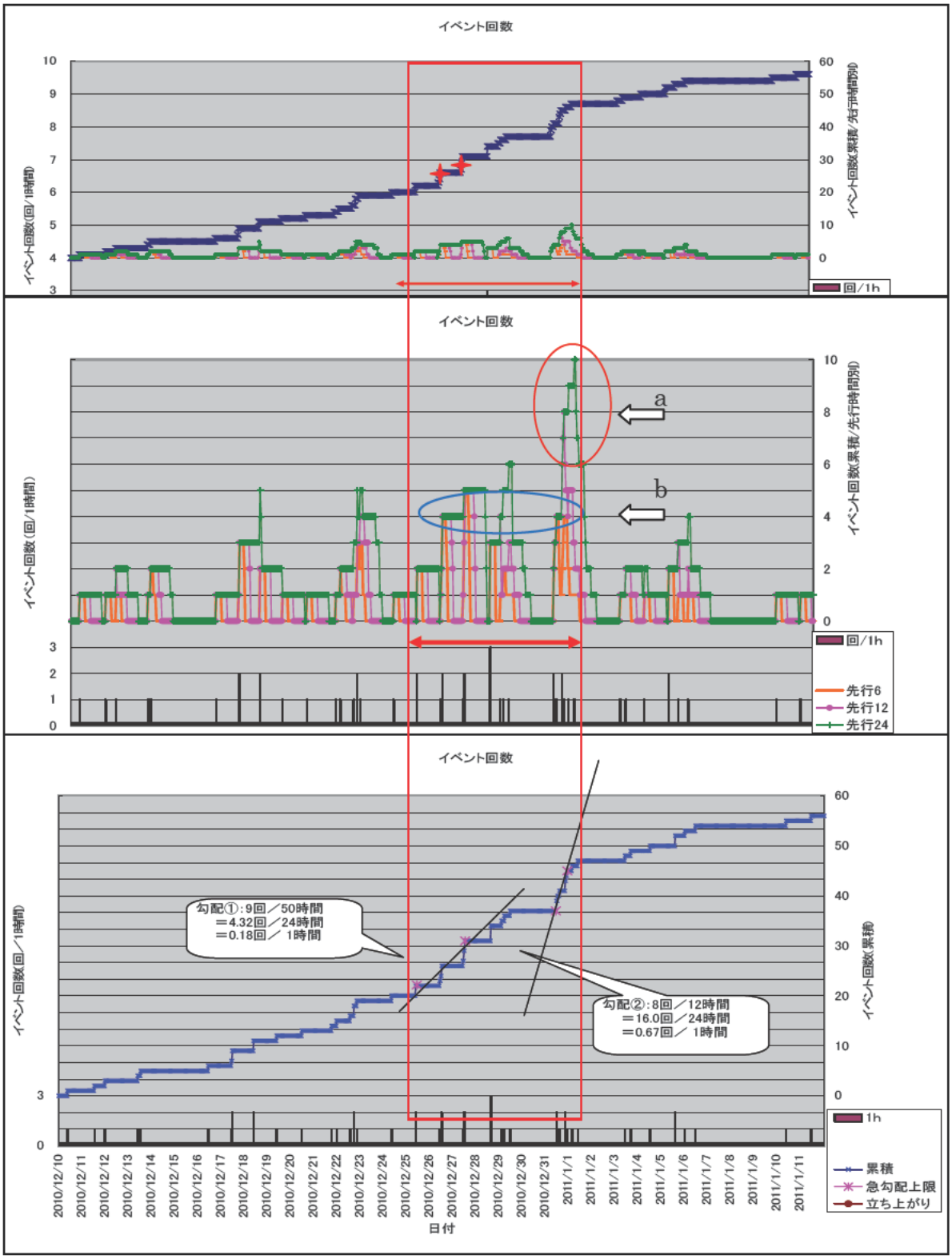

イベント回数
イベント回数(回/1時間)
イベント回数累積/先行時間別
回/1h
a
b
先行6
先行12
先行24
勾配①:9回／50時間
＝4.32回／24時間
＝0.18回／ 1時間
勾配②:8回／12時間
＝16.0回／24時間
＝0.67回／ 1時間
イベント回数累積
1h
累積
急勾配上限
立ち上がり
日付

図 6.23　目安値の検討

4）急激な頻度増加を把握するための目安値の設定

対象とした期間内では、時間あたりの最大頻度は 3 であり（1 回のみ記録）、6 時間あたり 4 回以上の頻度は図 6.23 枠の区間（2010/12/25～2011/01/01）内でのみ出現している（グラフ中 ◯ 範囲）。このため 6 時間あたり 4 回を目安値としてデータレビューを行う。

以上、具体的な提案目安値を表 6.5 に示す。

なお、この目安値は、崩落が発生した 3 事例から設定した目安値（5 回/先行 6 時間、10 回/先行 24 時間）よりも安全側の設定である。

表 6.5　大規模な変動の前兆検出のための提案目安値

種別	目　的	設　定　(案)
24 時間単位	要注意期間の抽出：約１日単位の増加傾向	8 回／先行 24 時間
6 時間単位	要注意期間の抽出：急激なイベント数増加	4 回／先行　6 時間

(3)　目安値の検証（データレビュー）

設定した目安値の有効性と課題を検証するため、一日あたりのイベント頻度とイベントの累積値、速度型センサーで測定した振動エネルギーが相対的に大きいイベント（便宜的に 500 以上）を図 6.24 のグラフ上にプロットした。

また、目安値の検証は、8 回/24 時間（図 6.25）および 4 回/6 時間（図 6.26）について行った。

今回の実験では、２種類のセンサーが使用され、しかもそれぞれが停電による欠測期間の前後でしきい値を変更している(速度型：15mKine→20mKine、加速度型：0.1G→0.05G)。

このため本来は停電前後の頻度の傾向変化にのみに言及できるが、目安値設定の手順を検討するにあたり、ここでは便宜的に停電前後のデータを同列に取り扱った。

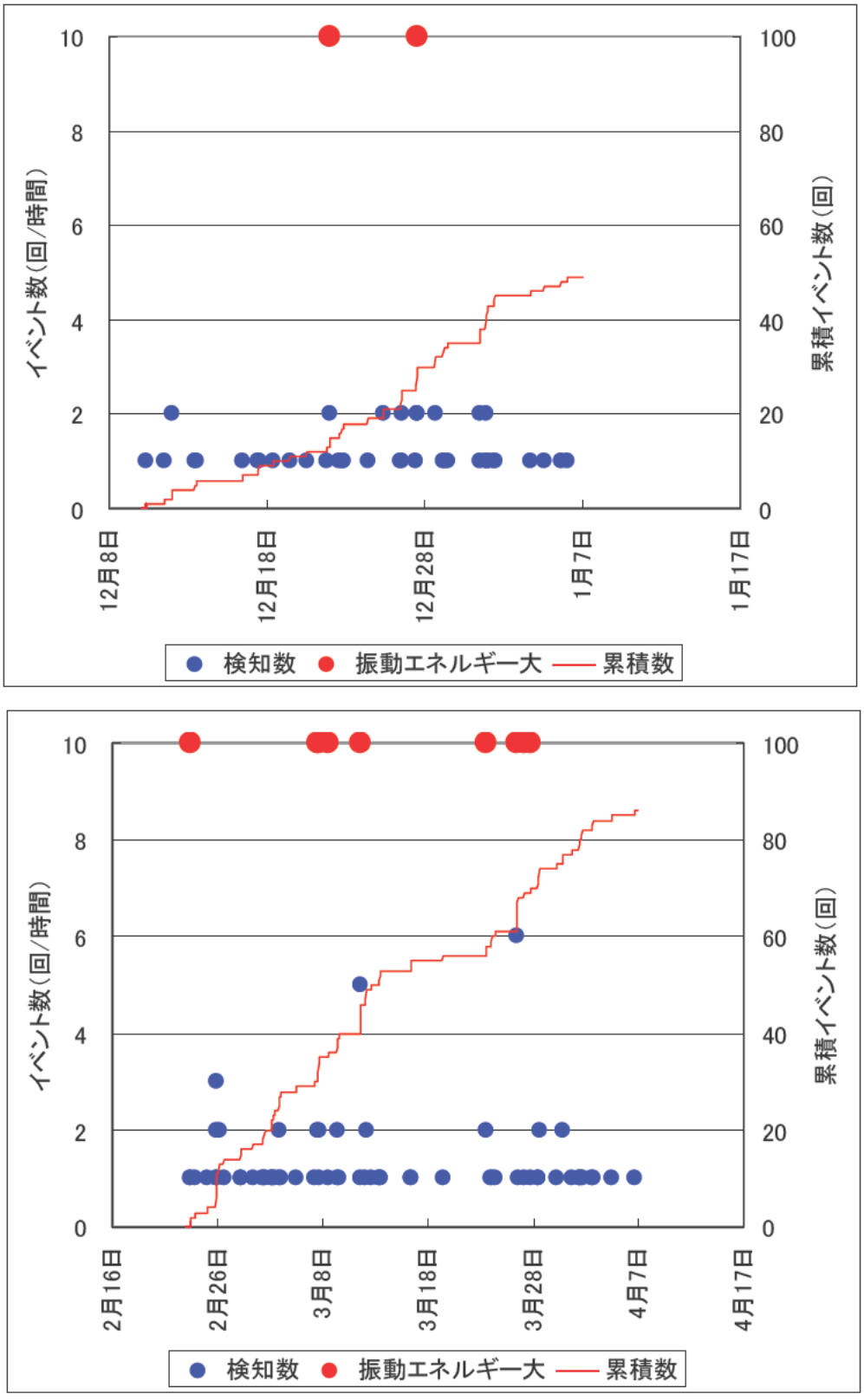


図 6.24　イベントの累積と相対的に振動エネルギーが高いイベント

① 8 回/24 時間の目安値の場合

設定した目安値の検証結果は以下の通りである（図 6.25）。

- 観測期間中に、設定時の 1 回を含め 5 回目安値を超えた。
- イベントの累積頻度増加を反映しており、2 月以降の頻度増加期に超過している。
- 目安値を超えた後に振動エネルギーが高いイベントが発生したのは、3/27 の 1 イベントのみである。
- 地震発生後、目安値を超えたのは 2 回である。

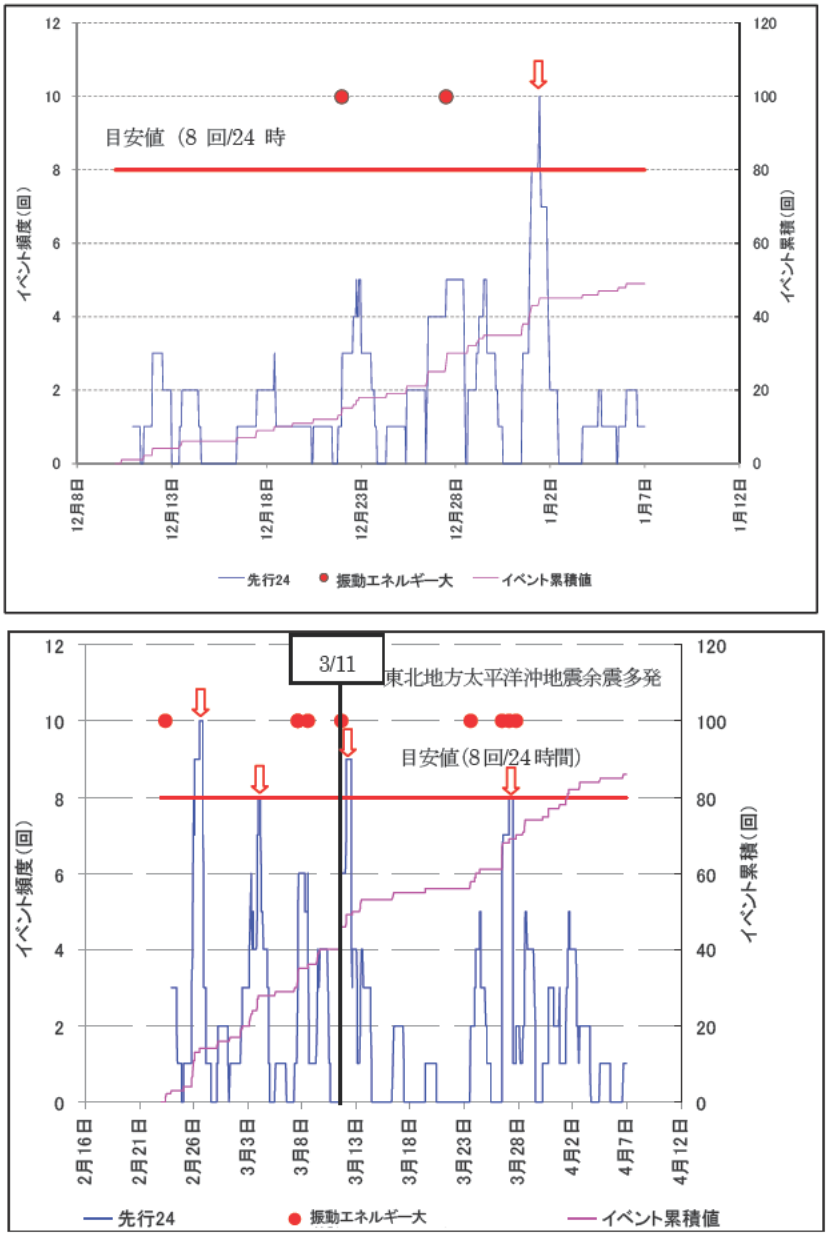


図 6.25　累積傾向と振動エネルギーが大きいイベントの関係（8 回/24 時間）

② 4 回/6 時間の目安値の場合

設定した目安値の検証結果は以下の通りである（図 6.26）。

- 観測期間中に、設定時の 3 回を含め 9 回目安値を超えた。
- 2 月以降の頻度増加期に目安値を超過しており、短期的な頻度増加に対応している。
- 目安値を超えた 12/28、3/7、3/26 の場合、翌日までに比較的大きい振動エネルギーを観測する落石が発生している（図 6.27：3/7 の例）。他の目安値超過時には発生していない。
- 3/11 の東北地方太平洋沖地震以降は余震が頻発し、落石のメカニズムが異なることが想定される。必ずしも振動エネルギーが大きいイベント前に目安値を超えていない（3 回中 1 回）。

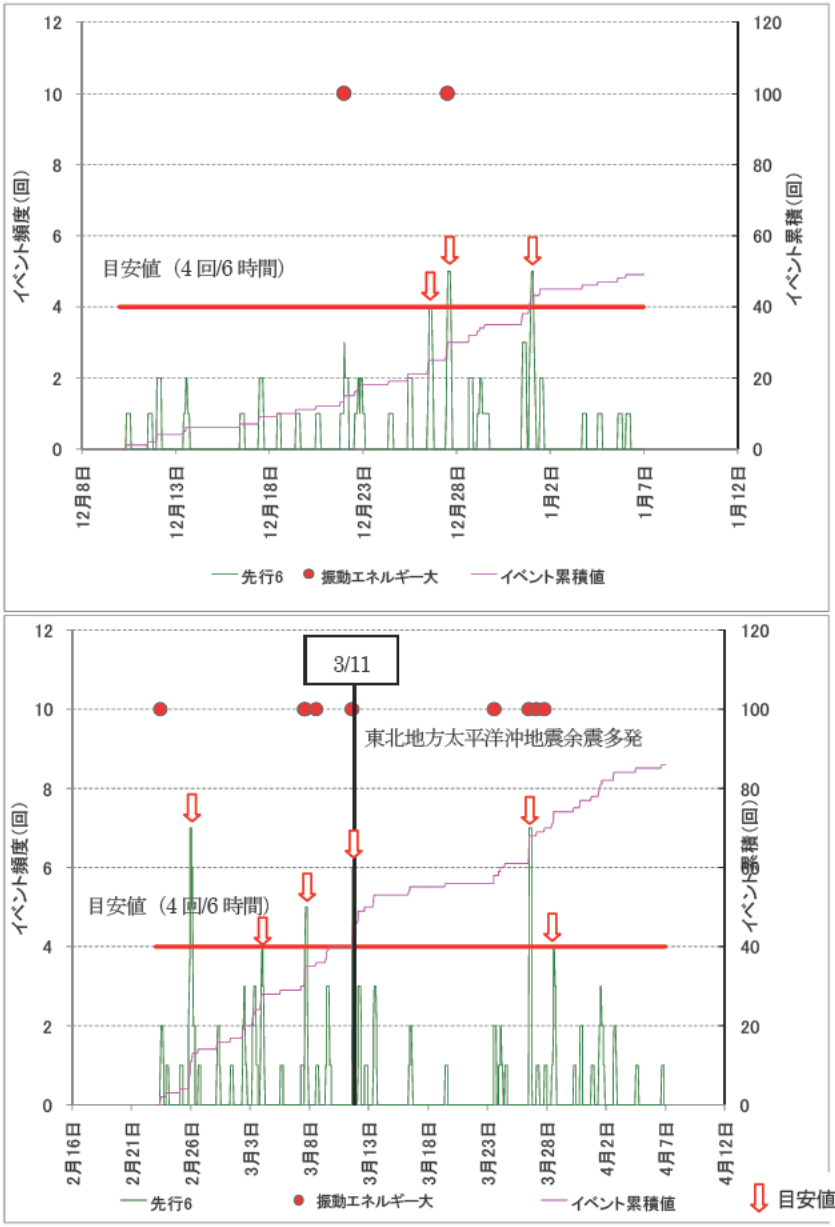


図 6.26　累積傾向と振動エネルギーが大きいイベントの関係（4 回/6 時間）

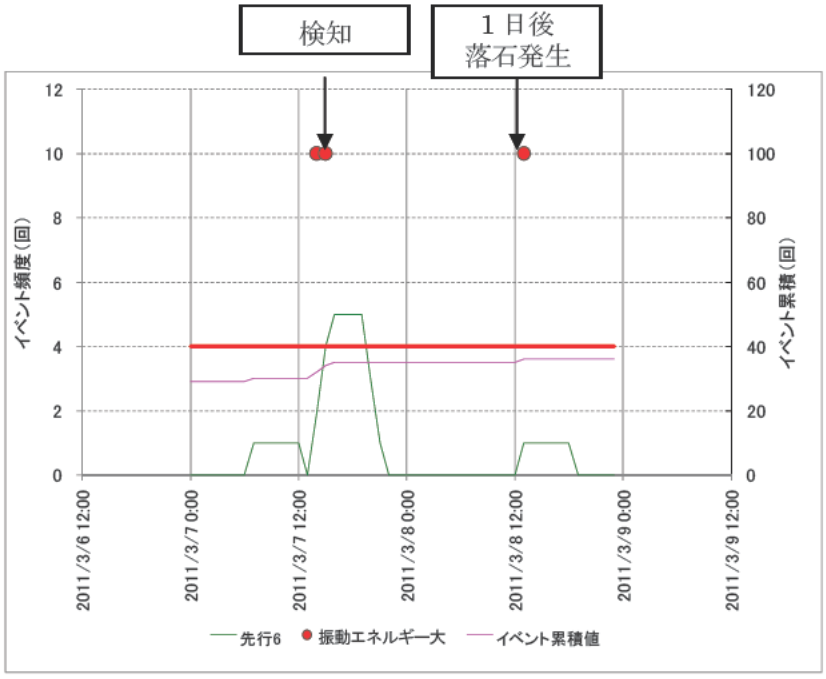


図 6.27　目安値超過後、振動エネルギーが大きいイベントを観測した例

③ 検証結果について

目安値の検証結果から以下の留意点を挙げることができる。

- 目安値は先行時間あたりの頻度で設定されているため、イベントの発生と同時に目安値超過が発生する。イベントは単独で発生するため、頻度の累積傾向が変化したかどうかは目安値の超過後、継続して取得された計測データで順次明らかになる。
- このため目安値の超過を体制変更等の判断基準にする場合、復帰の判断基準を別途定める必要がある。
- 目安値は各イベントのエネルギーの大小を考慮していないため、目安値を超過した後に必ず大きなエネルギーのイベント発生を検知するとは限らない。

6.3.5 実運用・見直し

本システムは試用段階であるため、実運用後に目安値の見直しを行うことが望ましい。特に以下の場合は現地調査等を実施し、調査結果を踏まえた目安値の見直しを検討する。

（1）データの蓄積

- 運用後、現地におけるデータが蓄積されることから、検知の状況に応じて目安値を再検証する。

（2）検知が少ない場合

- センサー等の機器の動作状況を確認
- 現地状況の確認
  - 仮設防護柵山側の落石状況
  - 検知している落石の特徴
  - 検知していない落石の特徴

（3）検知が多い場合

- 現地踏査の実施
  - 斜面の状況
  - 周辺の状況変化
  - 検知している落石の特徴
  - 斜面が不安定化している可能性があるため、安全に留意する。
- データの確認
  - 検知の周期性の確認
  - 地震や発破など周辺で発生したイベントの確認

6.4　目安値設定時の留意点

6.4.1　落石検知による崩落予測の課題と留意点

本システムは、ごく小規模の落石・飛石の仮設防護機能のみが期待されている仮設防護柵に、落石が複数回衝突する事象を計測の対象とし、現況では存在が認定されていない大規模な斜面変動の前兆現象を、落石を通じて間接的に捉えようとするものである。したがって、現場での注意喚起や通行規制の判断に使用する落石発生頻度の目安値については、十分に余裕を持った設定を行うことが望ましい。

また、斜面変動の前兆を、落石を介して把握する場合には図 6.28 の課題が存在する。

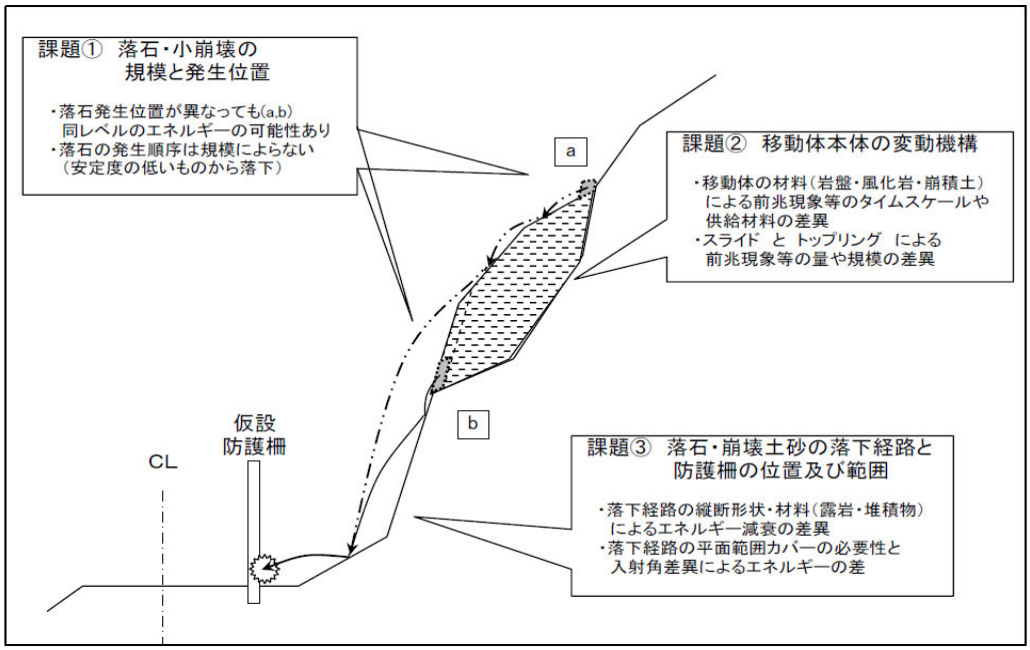


図 6.28　落石発生によって斜面変動の前兆を把握する場合の課題

6.4.2　目安値設定時の課題と留意点

目安値の設定は、仮設防護柵の限界を超えない落石や小崩落が、移動体本体の変動の前兆現象として生じることが前提である。また、落石が実際に斜面変動の前兆現象と確認された場合には、移動体本体の変動機構に応じた適切な応急対策や、監視体制の再構築を行う必要があるが、応急対策に伴って落石検知による前兆現象の把握が困難になる場合も想定されるので注意が必要である。

次に、目安値とする落石イベントの頻度であるが、地盤伸縮計で計測される移動体の速度のような連続データとは異なり、基本的に個別データの集合である。このため、設定例に示したように複数の単位時間内のイベント数を比較し、大きな傾向の変化と急激な変化双方を抽出できるよう慎重に設定する必要がある。

また、個々の落石イベントの規模についても注意が必要である。本システムでは移動体本体の不安定化に伴って副次的に発生する落石を仮設防護柵の地点で検知するため、図 6.28 の課題①、課題③を念頭に置く必要がある。以下の２点が重要である。

①検知対象の落石等の規模

イベント数が理想的に累積する場合でも、移動体本体の安定度が徐々に低下しているため、発生する落石や崩落の規模がシステム運用中に大きく変動する可能性がある。すなわち、目安値設定時には仮設防護柵で対応可能な規模の浮き石のみが確認されていたとしても、次に発生する落石の規模が同程度とは限らない。

②検知される落石等のエネルギー

仮設防護柵で検知されるイベントは、発生源から落下し転動経路を経て仮設防護柵の位置に到達した時点の落石(質量、形状、速度、個数、防護柵に対する衝突角度等)によるものである。このため防護柵の位置で検知されるイベントの数や、それぞれのイベントで検知されるエネルギーは、移動体周辺で発生している現象を間接的にとらえたものであることに注意する必要がある。

【参考・引用文献等】

1) 藤澤和範、小原嬢子：画像解析からみた東横山地すべりの活動履歴、地すべり研究 No.51,PP.8-17, 全国地すべりがけ崩れ対策協議会,2007

2) 河合成司、岡田藤博、吉田宇男、木下慎逸：2006(平成 18)年 5 月 13 日岐阜県揖斐川町で発生した東横山地すべり、日本地すべり学会誌、Vol.43,No.3、pp.35-38、2006

3) 北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会：北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会報告書資料集、2000

7. 提案する崩落検知システム

7.1 システムの概要

7.1.1 崩落検知システムの基本機構について

崩壊検知システムは、以下の４つの基本的な機構（機能）の組み合わせからなる。(図 7.1)

- 振動を速度、加速度の出力で測定する機能　　**→測定機能**
- 測定されたアナログ（電流、電圧）の振動データをデジタル値に変換する機能
  →A/D 変換機能
- 変換されたデジタル値のうち、交通振動などの落石衝撃以外の振動成分（周波数成分）をノイズとして取り除き、ある一定の振幅レベルを超過した場合、崩落として検出する解析機能　　**→演算処理機能**
- 崩落として検出された検知情報を遠隔地に伝送する機能　**→通信・ネットワーク機能**

① 測定機能

検知システムの要である振動測定には振動計を用いる。この振動計には第 2 章で述べたように「測定する対象別（出力種類)」による変位型、速度型および加速度型の 3 つの区分、あるいは「変換方法」による動電式と圧電式の 2 つの区分がある。本研究で利用した振動計は、動電式の速度型振動計と、圧電式の加速度型振動計（MEMS 加速度センサー含む）である。それぞれ振動計測分野やその他の分野での利用実績や信頼性は高い。今回の一連の実証実験でも現場への適用性が確認されたことから、上記の動電式速度型振動計、あるいは圧電式加速度型振動計のどちらかの振動計を採用すればよい。

② A/D 変換機能

振動計のデータは通常アナログ値であるため、解析処理のためのデジタル値に変換する必要がある。A/D変換は落石等の衝撃による比較的高い周波数の振動を的確に捉え、抽出するためのサンプリング速度や分解能が求められる。本研究での検証実験を踏まえれば、サンプリング周波数は 500Hz 以上、A/D 分解能は 10 ビット以上が望ましい。

③ 演算処理機能

解析機器には今回の知見で得られた仮設防護柵特有の固有周波数帯域（200～500Hz）の振動データを確実に抽出するためのデジタルフィルター（ハイパスフィルター、ローパスフィルター）が必要である。また、得られた振動データにおいて崩落検知の判定に必要なデータとノイズデータとの分離のため、振幅レベルや振幅継続時間（あるいは振幅レベル超過回数）の設定機能を有する必要がある。

④ 通信機能

崩落として検出された検知情報を遠隔地に通信する機能は、ネットワーク上でのデータ利用が現在一般的になっていることから、LAN に対応した通信規格（Ethernet、TCP/IP プロトコル）に準じた通信機能を有することが必須である。

一方、工事区域は工事車両が頻繁に出入りすることから、車両で切断される可能性を考えるとケーブル敷設はなるべく避けたい。したがって、仮設防護柵のセンサー取り付け位置からデータ収録・解析機器やネットワーク機器までの伝送は無線とすることが望ましい。

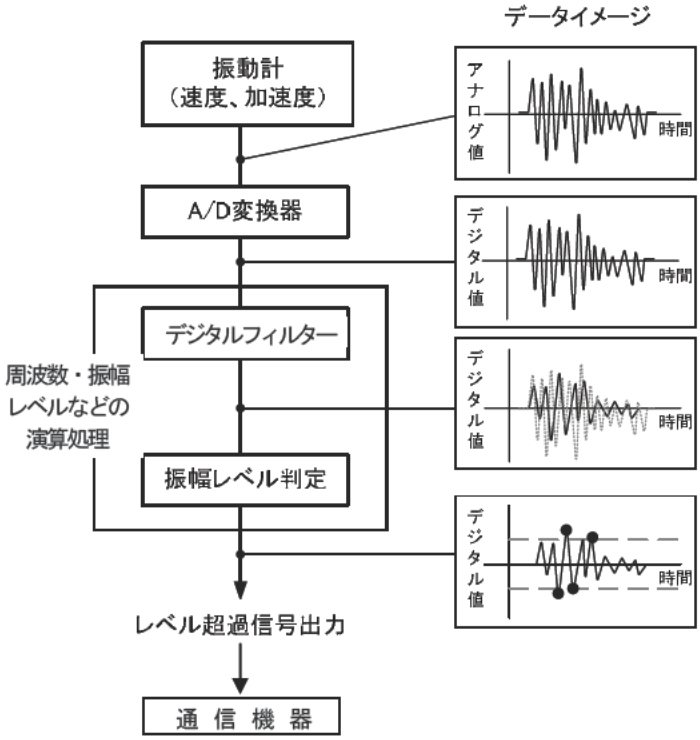


図 7.1　振動計測による崩壊検知システムの基本機構

7.1.2　導入目的とシステムの要件・種類 および仕様

崩落検知システムは、落石・崩落の危険性の高い場所に設置された仮設防護柵を利用して、落石・崩落発生を早期に検知し、道路管理者や工事関係者に伝えることがシステム導入の上で第一義的な目的である。一方、仮設防護柵に発生した落石や崩落の規模や位置を正確に検出することも、安全管理上の目的として重要である。

この 2 つの導入目的について、まず前者の目的達成のためのシステム要件としては、前項で述べた基本機構・機能を全て有する必要がある。しかし、後者の目的達成のためには、大量の波形データを収録するための「メモリー機能」と、収録データを基に波形処理や技術計算を踏まえた複雑な判定を行うための「高度な演算処理機能」をシステムに追加する必要がある。

本研究で検証した速度型崩落検知システム及び加速度型崩落検知システムの 2 種類の検知システムは、それぞれ以下のようにまとめられる。

① 速度型崩落検知システム：仮設防護柵への落石・崩落の規模を推定するシステム

② 加速度型崩落検知システム：仮設防護柵への落石・崩落の発生のみを検知するシステム

表 7.1 は、2 種類のシステムの仕様の比較である。仮設防護柵の安全管理に崩落検知システムを導入する場合、上記導入目的に応じてシステムを使い分ける必要がある。

以下に、開発したシステムとして、2 種類の崩落検知システムについて紹介する。

表 7.1　共同研究で使用した崩落検知システムの主な仕様の比較

本研究における名称	速度型崩落検知システム	加速度型崩落検知システム
開発会社名	川崎地質（株）	応用地質（株）
導入目的（区分）	検知に加えて落石・崩落の規模を推定	仮設防護柵への落石・崩落の発生のみを検知
測定機能（採用振動計）	動電型速度計（MC 型小型地震計）	圧電型加速度計（MEMS 加速度センサー:半導体ピエゾ方式）
A/D 変換機能	サンプリング 1kHz、処理分解能 16bit	サンプリング 500Hz、処理分解能 10bit
メモリー機能	100GB（波形連続記録で約 200 日分収録可能）	なし
演算処理機能		
デジタルフィルター	ハイパス、ローパス	ハイパス、ローパス
振幅レベル設定	任意レベル設定可能	設定可能（4G まで、0.05G 刻み）
振幅時間設定	任意時間設定可能	レベル超過回数で設定
波形モニター機能	あり	なし
波形区分機能	工事振動、自動車などの区分可能	なし
科学技術計算機能	振動エネルギー、検知位置、落石質量計算	なし
処理結果表示機能	イベント数、エネルギー時間変化、最大振幅（質量）の時間変化、検知位置の平面分布と時間変化などのグラフ表示	イベント数の経時変化グラフ（別途ネットワークを通じた処理アプリケーションによる）
セルフチェック機能	観測部/送信部と記録部/処理部の状態を 1 日 1 回以上セルフチェックし、異常の有無をメール送信する	検知ユニットや中継ユニットの電池切れやリンク切れをメインユニットからメール送信する
通信・ネットワーク機能		
エリア内通信機能	センサー～ネットワーク機器までの通信は、Bluetooth 採用（通信距離：見通し約 300m）	センサー～ネットワーク機器までの通信は特定小電力無線採用（通信距離：見通し最大 200m）
ネットワーク機能	Ethernet、TCP/IP プロトコル	Ethernet、TCP/IP プロトコル（検知センサー情報の E メール機能）
警報出力機能	なし	あり（圧電ブザー、接点出力）

7.2 共同研究で開発した崩落検知システム

7.2.1 速度型崩落検知システム（仮設防護柵の落石・小崩落の規模を推定するシステム）

ここでは、仮設防護柵へ衝突する落石の検知回数を計測すると共に、落石・小崩落の規模を推定できるシステムについて記載する。

(1) システムの概要

表 7.2 は、落石・小崩落の規模を推定するシステムの仕様である。

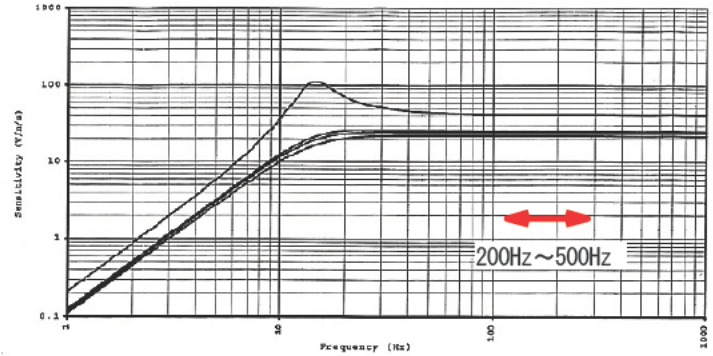
図 7.2～図 7.4 は、それぞれ振動センサーの外観図と周波数特性、各システムの外観図と構成ブロック図である。

表 7.2 速度型小型地震計を使用した検知システムの性能

種 類	数 量	製 品 仕 様	
振動センサー	1成分3個	形 式	MC型小型地震計 （速度計：水平動のみ）
		固有周波数	14Hz （28Hz可）
観測部/送信部	3成分1台	周 波 数	200Hz～500Hz
		増 幅 度	1倍，2倍，・・・，100倍 （プログラムにより可変）
		サンプリング	1kHz （1msec）
		分 解 能	16Bit以上
		通信方式	Bluetooth （通信距離：見通約300m）
		記録方式	波形の連続送出方式 （トリガー無し）
記 録 部	1台	装置形式	WindowsXp/7 パソコン
		通信方式	Bluetooth （通信距離：見通約300m）
		観測方式	連続記録方式 （100GByteで約200日）
処 理 部 （記録部と兼用）	1台	モニター機能	波形を常時表示することによる監視
		トリガー機能	ソフトウエアトリガー方式 （不感時間帯の除去）
		ノイズ除去機能	卓越周波数 ：200Hz（変更可）以下はノイズ 振動継続時間：0.1S（変更可）以下は空電ノイズ
		波形区分機能	落石、自動車、発破（段発）、工事など
		波形処理機能	疑似エネルギー、検知位置計算、落石質量計算
		処理結果 表示機能	1時間別（変更可）検知頻度グラフ 1時間別（変更可）疑似エネルギー時間変化グラフ 1時間別（変更可）最大振幅（質量）の時間変化グラフ 検知位置の平面分布と時間変化グラフ
		通信機能	TCP/IP通信により波形と処理結果等を遠隔地に送出

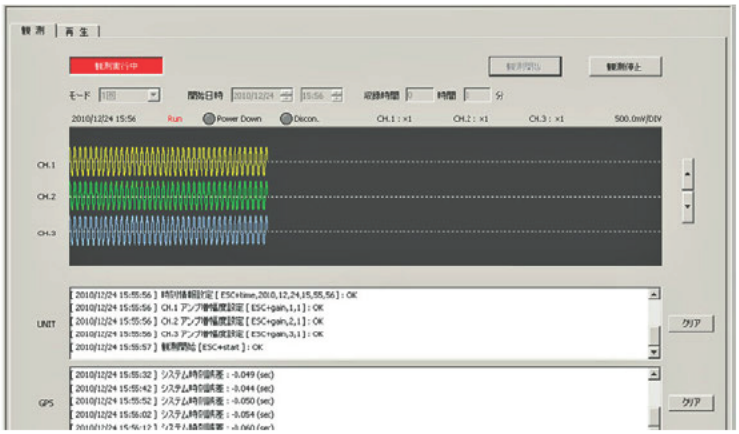
注）相模原と足尾の実験結果から、鋼製横矢板の場合 3 スパン（6m）～4 スパン（8m）程度までの検知が可能である。

固有周波数 14Hz の速度型地震計



同左の周波数特性（200Hz～500Hz のみ使用）

図 7.2 振動センサーと周波数特性



観測／送信装置　　記録部（パソコン）の画面[連続記録中]

図 7.3 検知システムの外観例（左）と監視画面例（右）

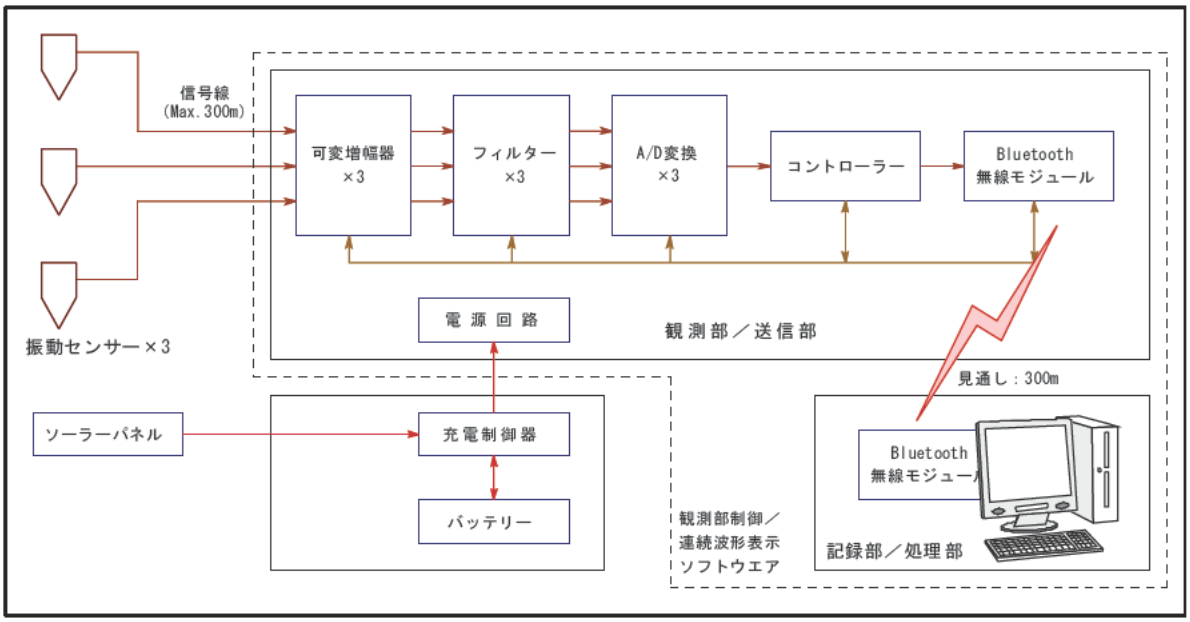


図 7.4 検知システムの構成ブロック図

① 振動センサー（図 7.2 参照）

- 固有周波数 14Hz の小型地震計（水平動）を使用する。
- 屋外に設置することから、防水ケースに格納されているものを使用する。
- 落石や崩落の位置を推定するためには最低 3 個設置する必要があるが、発生数（検知数）のみ必要とする場合は、最低 1 個設置すればよい。
- 比較的質量があるので、仮設防護柵の H 鋼に設置するためのビス穴を備えているものが望ましい。

② 観測部／送信部（図 7.3 参照）

- 最大 3 個の振動センサー（小型地震計）を、メタルケーブルで接続できる機能とする。
- 増幅度はプログラムにより、最低 1 倍から最大 100 倍まで、7 段階に可変できる。
- 周波数特性は、200Hz～500Hz を基本とするが、振動波形記録を一旦監視用パソコンに収録した後で、デジタルフィルターにより 200Hz～500Hz の波形を抽出してもよい。
- 波形をデジタル化する分解能は 16bit 以上，サンプリング周波数は 1Hz 以上とする。
- 落石や崩壊が急激に増加した場合でも、全ての振動を検知できるようにシステムの不感時間を無くした設計が望ましく、可能であればある一定の期間の振動波形を連続して観測／送信できる機能とする。
- 最大 3 個の振動センサーからの振動波形信号を、例えば Bluetooth 無線で送信できる機能とする。 この場合，通信距離は見通で約 300m 程度までである。

③ 記録部／処理部（図 7.4 参照）

- O.S.が WindowsXp あるいは Windows7 のパソコンとする。
- 観測部／送信部から伝送されてくる波形信号を、一定期間連続的に保存できるプログラムを内蔵している。
- 落石・崩落の検知頻度、規模や検知した位置を推定・表示するプログラムを内蔵し、保存した波形に対してほぼリアルタイムの処理が可能である。
- 処理結果をインターネットあるいはイントラネットで、遠隔地へ通信する機能を有している。

④ ソフトウエア群

・図 7.5 は、落石検知システムで使用する 3 つのソフトウエアの名称と各機能である。

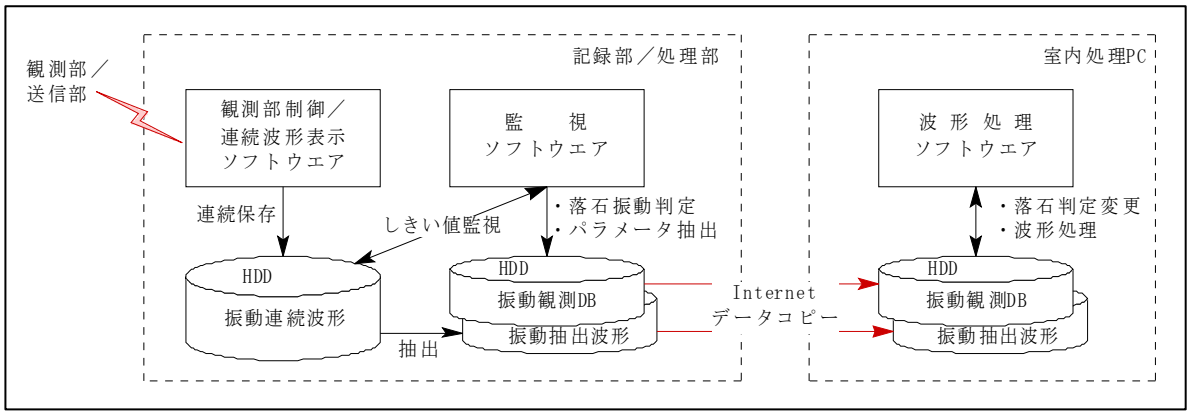


図 7.5 落石検知システムで使用する 3 種類のソフトウエア

（ｉ）観測部制御／連続波形表示ソフトウエア

- 「記録部／処理部」で常時起動しているプログラムであって、「観測部／送信部」の制御と波形を連続して表示する機能がある。
- 振動波形データは、連続する 1 分間のデータファイルとして保存される。
- 連続記録モードの場合，「記録開始」ボタンが押された後は、「記録停止」ボタンが押されるか、ハードディスクが一杯になるまで波形記録を取り続ける。

（ii）監視ソフトウエア

- 「記録部／処理部」で常時起動しているプログラムであって、振動の検知（トリガー機能）、振動波形の抽出、波形種別の判定及び振動パラメーターの抽出を行う。
- 本ソフトウエアの詳細は、「**(2) 落石検知機構**」で詳しく説明する。

（iii）波形処理ソフトウエア

- 室内の PC にインストールして起動させるソフトウエアであって、振動波形の再生や落石頻度のグラフ化などの機能がある。
- 本ソフトウエアの詳細は、「**(4) 検知データの取りまとめ**」で詳しく説明する。

⑵ 落石検知機構（監視ソフトウエアの機能）

本システムの波形記録は、原則として連続記録方式であって、落石の検知と波形の種別判定などは、「記録部／処理部」のパソコンに常駐し、常に起動している専用の「監視ソフトウエア」が担当する。 以下は、その原理や機能である。

① 落石検知機構の原理

図 7.6 は、振動波形を常時監視するソフトウエアの仕組み（機能）である。

- 図 7.7 に示す原理により、波形が保存された 1 分間のファイルを監視する。
- あらかじめ設定したしきい値（レベル）を超えた振動を検知すると、波形の切出しと保存、波形の分類などの連続した処理を行って、次の波形振幅を監視する状態に戻る。

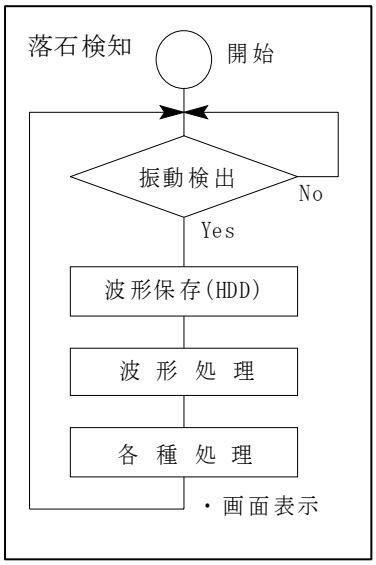


図 7.6 監視ソフトの機能

② 落石検知（波形処理）の原理

- 監視ソフトは、新規に保存された振動波形ファイル（1 分間）が保存されると直ちにデータを読み出し、図 7.7 のようにあらかじめ設定したしきい値との比較を行う（最大 1 分間の時間遅れあり）。
- 「＋しきい値」あるいは「－しきい値」を超えた場合は、その時点から「-1 秒」～「+3 秒」の波形データ（4 秒間）を切り出して別途保存すると共に、波形種別の判定と波形パラメーターの抽出処理を行う。
- この 4 秒間が、2 つの 1 分間データファイルにまたがっている場合も対処する。
- 抽出処理などが終了した場合、前記の「+3 秒」の時点から、しきい値との比較処理を再開する。

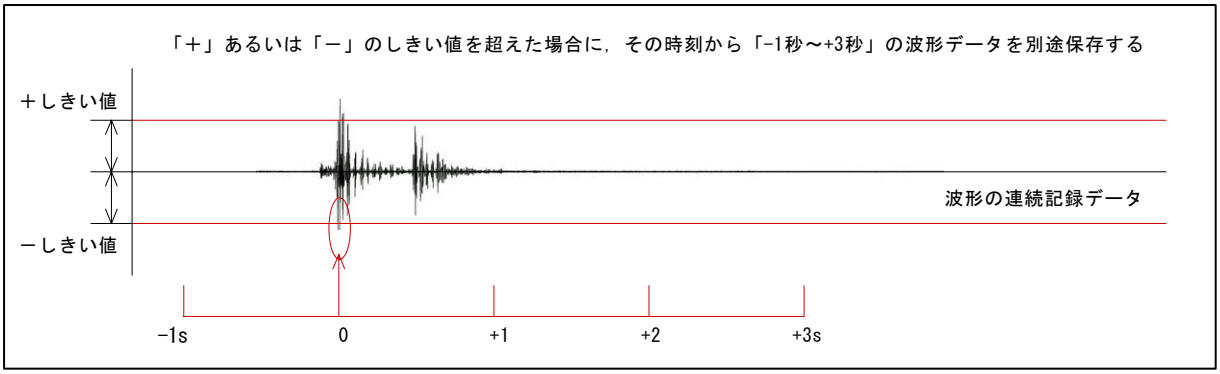


図 7.7 落石検知の原理（イメージ）

③ 落石振動の判定

- 前記の処理でしきい値を超えた波形は、必ずしも落石振動ではない可能性があるので、図 7.8 の処理手順に従って波形の種別を判定する。この波形処理手順は、昨年度の相模原と今年度の足尾での基礎実験結果から求めた成果である。
- 以下の条件を同時にクリアしている場合に落石振動と判定し、「振動観測データベース（後述）」に登録する。

  A：卓越周波数が 200Hz～500Hz の場合

  B：振動継続時間が 0.1 秒より長い場合
- 「振動観測データベース」は、検出した振動の種類、最大振幅や周波数などを記録するファイルであって、リアルタイムグラフ化処理や、室内でのデータ処理の際に使用するためのものである。表 7.3 に、振動観測データベースのイメージを示す。

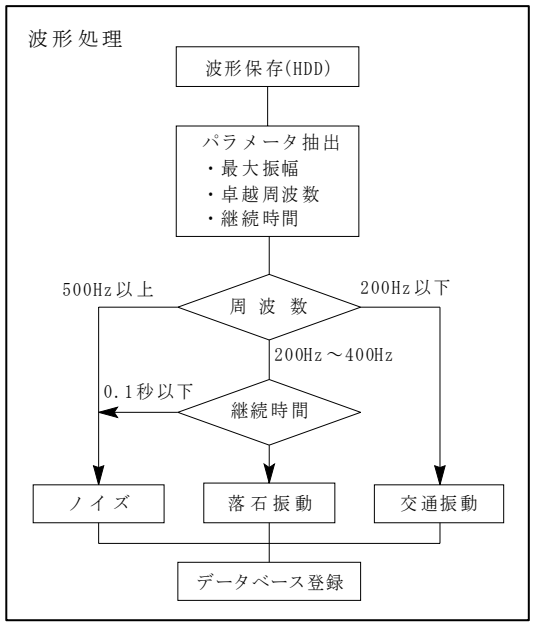


図 7.8 落石振動を判定するための手順

表 7.3　振動観測データベース（イメージ）

種類	日時	ﾄﾘｶﾞCH	ｶｳﾝﾄ	開始T	終了T	周波数	最大CH	最大値	ch1	ch2	ch3	ch4
落石	2011/3/1 8:35	3	113	0.503	0.903	190	3	1313.9	6.6	686.3	1313.9	298.3
落石	2011/3/2 8:57	4	13	0.502	0.569	251	4	488.8	4.2	14.3	13.7	488.8
落石	2011/3/2 9:51	2	90	0.511	0.884	210	2	246.2	7.0	246.2	117.7	38.3
落石	2011/3/2 12:53	4	10	0.510	0.529	550	4	355.7	3.7	8.0	12.4	355.7
落石	2011/3/3 4:47	2	0	0.414	4.088	251	2	128.3	6.1	128.3	37.6	18.0
落石	2011/3/3 5:00	3	470	0.508	4.075	251	3	161.8	6.0	23.9	161.8	4.4
落石	2011/3/3 7:16	2	0	0.508	0.670	251	2	93.8	5.8	93.8	23.8	4.5
落石	2011/3/3 10:49	3	0	0.417	4.083	251	4	34.9	5.8	20.1	19.3	34.9
ﾉｲｽﾞ	2011/3/3 15:44	3	0	0.414	4.092	251	3	20.7	5.7	17.0	20.7	4.4
落石	2011/3/3 20:40	2	0	0.503	3.903	251	2	78.9	6.1	78.9	24.2	8.8
落石	2011/3/3 22:23	3	0	0.487	4.082	251	3	129.2	6.2	24.4	129.2	4.9
落石	2011/3/3 22:36	2	0	0.498	1.163	251	2	80.5	6.0	80.5	36.4	4.7
落石	2011/3/4 0:58	2	365	0.511	2.501	293	2	688.1	7.1	688.1	482.4	40.1
ﾉｲｽﾞ	2011/3/5 19:10	2	0	0.413	4.092	251	3	24.0	7.1	21.3	24.0	5.4

④ 各種処理（モニタリング）

- 落石検知は「記録部／処理部」で専用の「B:監視ソフトウエア」によって行うが、本ソフトにはその結果をリアルタイムで表示する機能を有している。図 7.9 は、そのイメージである。

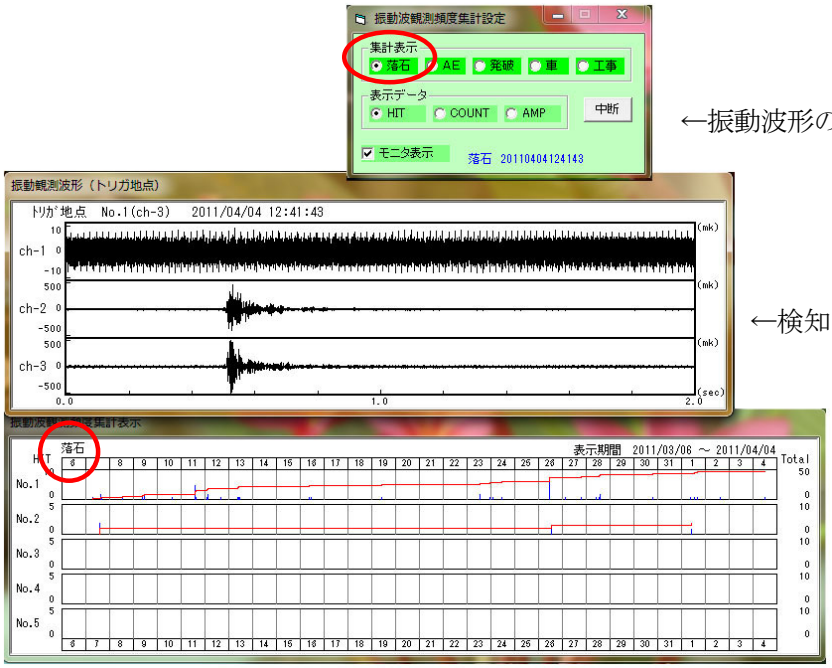


図 7.9 落石振動のリアルタイム監視（イメージ）

- 本システムのモニタリングは「波形種別」、「波形」と「10 分集計の検知頻度」などをリアルタイムに表示する機能である。
- すなわち、「② 落石検知の原理」で抽出した全長 4 秒間の波形記録に対して「③ 落石振動の判定」を行い、その結果を以下のようにリアルタイムで表示する。

  A：判定結果と波形は、波形の種類にかかわらず全て表示

  B：集計結果は、あらかじめ選択した種類について表示（例、落石ならその頻度）
- 本システムを一旦停止して再起動させた場合，振動観測データベースに保存されているデータから 1 ヶ月前に遡って表示する。

⑶ システムの現地設置・調整

① システムの設置方法

（ｉ）センサーの設置方法

- センサーは、固有周波数 14Hz の速度型地震計を使用する。
- 4 スパン置きに設置することを基本とするが、H 形鋼の種類や設置状況、ノイズの状況などによっては、より狭く設置する場合やより広く設置する場合があるため、完全に固定する前に振り子方式衝撃試験を実施して設置間隔を決定する。
- 図 7.10 は、固有周波数 14Hz の速度型地震計の設置例である。
- 図 7.11 （左右）は、設置事例の写真である。

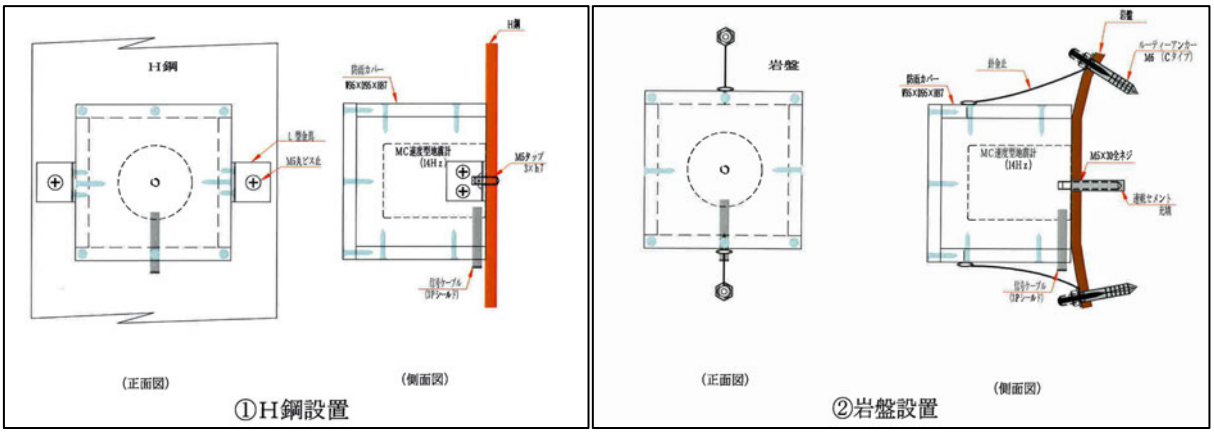


図 7.10 固有周波数 14Hz の速度型地震計の設置方法（例）

図 7.11 固有周波数 14Hz の速度型地震計の設置状況（例）

- 地震計本体の表面積が大きいため、雨粒の影響が大きいため必ず「防雨カバー」が必要である。

・ 地震計本体は「M5 タップ」孔とし、木製防羽カバーは「M5 丸ビス留め」とする。
・ 地震計を岩盤に設置することも可能であって、その場合は図 7.11（右）のように設置すればよい。 防雨カバーは必ず必要である。

（ⅱ）ケーブルの設置方法

・ ケーブルにはφ15mm～20mm のエフレックス管（保護管）を必ず取り付ける。これは、小動物の食害と風雨による劣化を防止するためである。
・ 保護管は概ね 1m 間隔で H 形鋼や地盤（岩盤）に固定すること。
・ 図 7.11 （左右）は、設置事例の写真である。

（ⅲ）観測／送信部の設置方法

・ 観測／送信部は、防水・防塵構造の開閉式プラボックスなどに収納する。
・ 観測／送信部のサイズは「200mm×200mm×50mm」程度であるため、プラボックスのサイズは「300mm×400mm×150mm」程度は必要となる。
・ Bluetooth 無線アンテナを外付けにする、ソーラーパネルを使用するなどにより、プラボックスからの引出端子の個数や形状が異なるので、注意が必要である。

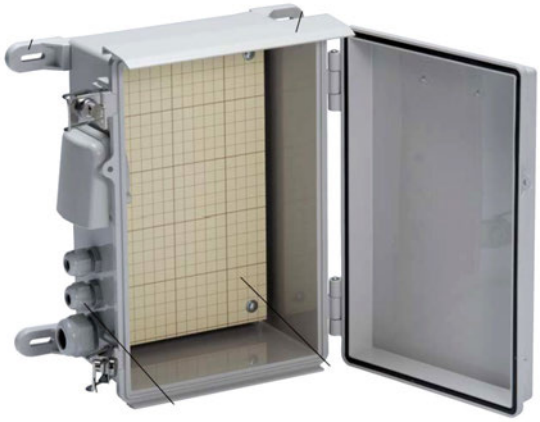


図 7.12 開閉式プラボックスの例

（ⅳ）記録部／処理部の設置方法

・ 記録部／処理部は、現場事務所あるいは特設の観測小屋内に設置する。
・ AC-100V を必要とする。
・ 遠隔地へデータを転送するには、インターネット回線が必要である。 「無線 LAN」各種の「携帯電話網」と固定電話の「ISDN」などの中から適宜選択すればよい。

② システムの調整方法

（ⅰ）ノイズ試験

・ システムの設置が終了した時点で、以下に示すノイズの状態を測定して可能な限り除去する必要がある。表 7.4 に主なノイズとその除去方法を略記する。

表 7.4 主なノイズと除去の方法

種　類	主 な 原 因	留 意 点 や 対 策 方 法
電源ノイズ	電源・信号回線の 微小なリーク	・検知システムのシャーシーをアースする ・入力の平衡バランサーの調整
雷（空電）ノイズ	雷放電	・除去はほぼ不可能なので、処理ソフトで除外する ・余り多い場合にはしきい値を上げることで対処できるが、小さな落石振動は検知できなくなるので留意が必要
工事振動など	特に掘削機、穿孔機	・工事誌などを入手して、後日比較検討する ・しきい値を上げることで対処できるが、小さな落石振動は検知できなくなるので留意が必要
自動車振動	高速走行や重量車	・200Hz～500Hzの周波数帯で、影響がないことを確認

（ⅱ）振り子方式衝撃実験＞

- 落石の位置や質量を推定するために必要なパラメーターを求める目的で実施する。併せて、ノイズの状況を確認する。
- 図 7.13 に、振り子方式衝撃実験を行う場所の例と実験方法の概要を示す。
- 速度型地震計の設置間隔は、振り子方式衝撃実験による擬似落石衝撃振動が確実に検知できる間隔とする（実証実験結果から、3～5 スパン程度が目安）。

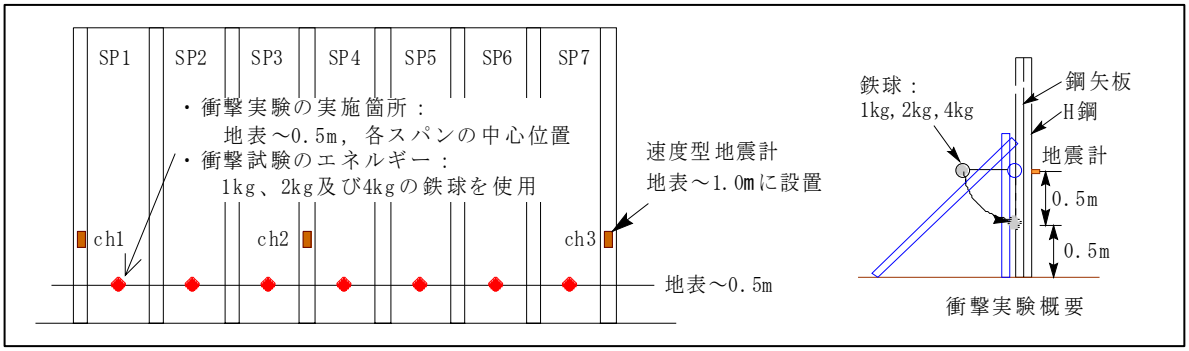


図 7.13 振り子方式衝撃実験を行う場所の例と実験方法の概要

- 使用する鉄球は質量が 1kg、2kg と 4kg とし、図 7.13 に示す架台を使用して自由落下させ、その時の全てのセンサーで振動波形を記録する。
- 実験結果から、最大振幅の最大振幅の値を読み取ると共に「ch1/ch2」、「ch3/ch2」及び「ch1/ch3」を計算し、図 7.14 に例示するグラフを作成する。

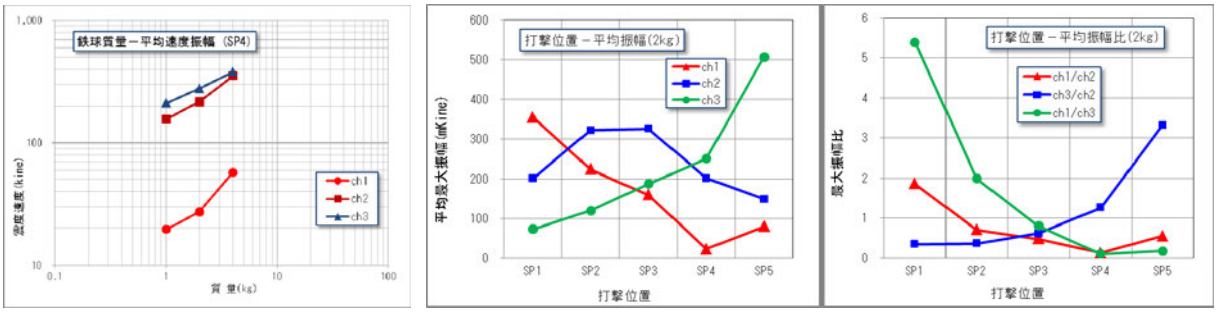


図 7.14 打撃試験結果のまとめ方の例

- 「ch1/ch2」、「ch3/ch2」及び「ch1/ch3」の各値は、落石を検知した時に同様の各比を求め、どの鋼矢板（スパン）に衝突したかを推定するために使用する。
- 打撃位置－振動の大きさの関係で、距離による減衰が激しい場合は、検知センサーの設置区間を短くするなどの対策が必要である。

（iii）無線によるデータ通信の確認

- 本システムでは、データ通信に Bluetooth 無線を使用している。
- 見通し距離で 300m が公称の通信距離であるが、途中に障害物がある場合や、電波状態の不安定さや高周波ノイズなどにより、この公称値が確保されないケースも存在する。
- システムの設置直後しばらくは、通信状態を十分留意してモニターし、波形データの受信が途切れるようであれば、良好な通信状態が確保できるよう設置位置の見直しなどを行う。

（iv）セルフチェック機能の確認と送信先の設定

- 本システムは、観測部/送信部と記録部/処理部の状態を 1 日 1 回以上セルフチェックし、その結果をメール送信する機能を備えているので、設置直後は本機能が働くかどうかを確認する。
- 振動を検知した場合とセルフチェックを実施した場合には、その結果を e-mail 送信する機能があるため、受信者の所属・氏名と e-mail アドレスを設定し、その機能が働くことを確認する。

注） 定時に実視されるセルフチェックの結果である e-mail が到着しない場合は、記録部/処理部あるいは通信システムが不具合状態となっている可能性があるため、直ちに原因の究明と復旧対策を実施すること。

⑷ 検知データの取りまとめ

本システムでは、「記録部／処理部（Windows PC)」で常時起動している「監視ソフトウエア」によって「振動観測データベース」が生成する仕組みを採用している。

ここでは、そのデータベースと別途保存された波形データから検知データをとりまとめる方法について略記する。

使用するのは「波形処理ソフトウエア」である。

① 波形の再生と波形種別の手動変更

- 振動波形の表示イメージを 図 7.15 に示す。
- 「波形処理ソフトウエア」には、その他に以下の機能を備えている。

  A：振幅軸と時間軸の拡大縮小

  B：波形データの CSV 出力（下図、左下のボタン）

  C：バンドパス（BP）フィルター処理

  D：FFT 処理

  E：波形種別を手動で変更する機能（下図、右下のボタン）

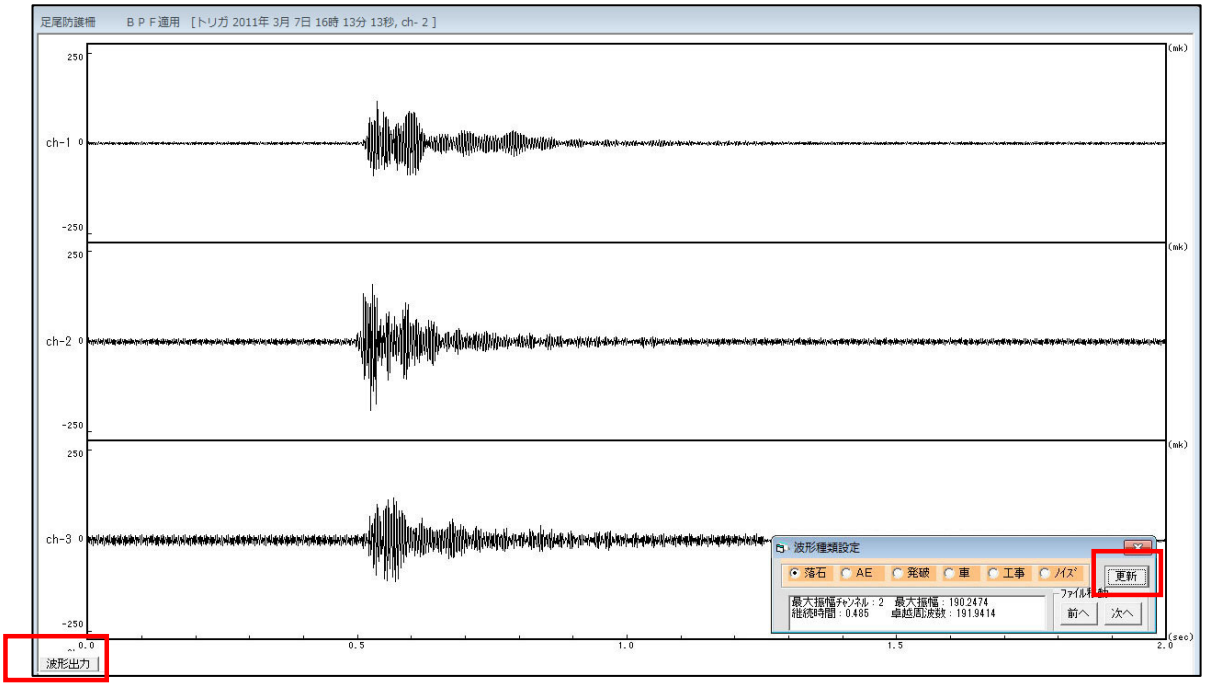


図 7.15 波形表示（イメージ）

② 落石イベントの表示

- 落石イベントの表示イメージを 図 7.16 に示す。
- 「再生ソフトウエア」には、検知頻度の他に「最大振幅値」の変化を図化する機能を備えている。

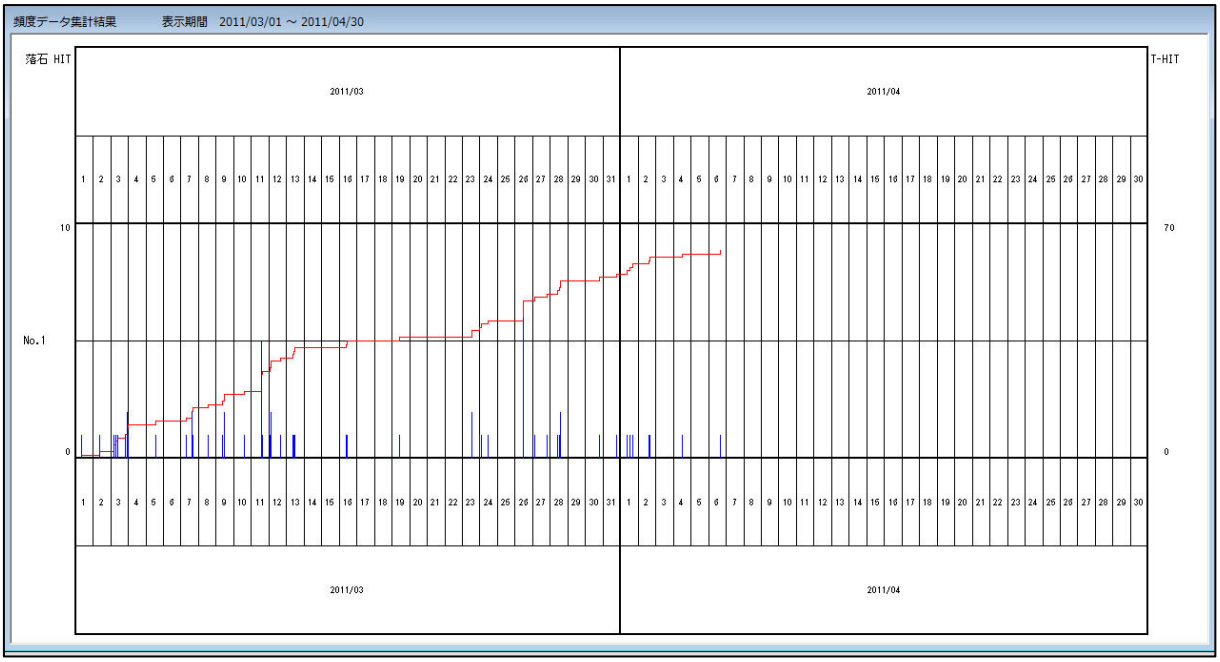


図 7.16 落石イベント表示（イメージ）

③ 振動観測データの出力表示

- 「波形処理ソフトウエア」には、振動観測データベースのデータをそのまま「CSV 出力」する機能を持っている。
- 「CSV 出力」を選択し、次に必要な期間などを入力すると、検知データのパラメーターが出力されるので、EXCEL を使用した頻度グラフや発生位置と落石質量の推定などに利用が可能である。
- 「CSV 出力」のイメージは「表 7.3　振動観測データベース」に示した。

7.2.2 加速度型崩落検知システム（仮設防護柵への落石・崩落の発生のみを検知する崩落検知システム）

仮設防護柵へ衝突する落石を検知し、検知回数を計測することを目的とした崩落検知システムを紹介する。

(1) システムの概要

表 7.5 にシステムの仕様、図 7.17 に構成と外観、図 7.18 にシステムのブロック図を示す。本システムの基本構成は、図 7.17、図 7.18 に示すように検知ユニット、中継ユニットおよびメインユニットの 3 つのユニットからなる。付属装置として、NTT 回線接続用ルーター、無停電電源装置（UPS）、監視カメラ（ネットワーク対応、オプション）、データ集計用アプリケーション（Web システム）がある。以下、3 つのユニットについて説明する。

① 検知ユニット

- 振動測定、A/D 変換、周波数フィルタリング、振幅レベル判定ならびに検知情報の通信といった、崩落検知に最低限必要な機能を全て盛り込んだ機器である。
- 仮設防護柵の H 形鋼に直接取り付けることで、落石などの衝撃による振動を計測し、演算処理による検知情報を無線通信（特定省電力無線）によって中継ユニットに伝送する。
- ４段階の振動レベルを設定することができる。

② 中継ユニット

- 検知ユニットの検知情報をメインユニットに無線通信（特定小電力無線）により伝送する機器である。
- 全部で 10 台の検知ユニットからの検知情報を伝送することが可能である。
- 同一箇所の崩落に対して反応した複数の検知ユニットからの検知情報が同時にメインユニットに伝送されないよう、通信プログラムに組み込まれた不感帯時間（10 秒間）により検知情報の伝送を制御する。

③ メインユニット

- ネットワーク通信機能を有し、中継ユニットからの検知情報をインターネット伝送用にプロトコル変換し、E メール形式で送信する機器である。
- 警報出力機能として、ブザーの他、接点出力機能（１接点）を有し、監視カメラやその他の警報装置の起動制御が可能である。
- 検知ユニットに予め設定した 4 段階の振幅レベルをメインユニットからの遠隔設定で変更できる。

・ 検知ユニットや中継ユニットの電池切れやリンク切れの状態をメインユニットからメール送信できる。

表 7.5　落石・崩落の発生のみを検知する崩落検知システムの仕様例

■共通	
電波方式	特定小電力無線　ARIB-T67準拠
無線周波数	429.25MHz～429.7375MHz、12.5KHz間隔、40chの中から10ch使用
送信電力	10mW
送信距離	100m（環境条件による）
	※検知ユニット～中継ユニット間100m、中継ユニット～メインユニット間100m
検知ユニット最大数	10台（中継ユニット当たり）
■ 検知ユニット	
電源制御	微振動センサー（ボール接点式、30gal以上で感知）
加速度センサータイプ	半導体ピエゾ抵抗型、3軸
A/D変換	サンプリング500Hz、分解能10bit
フィルタリング	デジタルフィルター（ハイパスフィルター、ローパスフィルター）
振幅レベル設定	4段階、設定下限値0.05G、設定上限値4G　※メインユニットからの変更可能
電　源	アルカリ単三電池3本
動作時間	約1年（常時警戒モードの場合）
動作温度	-10～60℃　（結露なきこと）
材質、保護等級	ポリカーボネート、IP54準拠
寸　法	60（W）×120（H）×40（D）mm　（突起物含まず）
■ 中継ユニット	
通信制御	不感帯時間（10秒）による受信待機機能
電　源	アルカリ単一電池2本
動作時間	約1年（使用条件による）
動作温度	-10～60℃　（結露なきこと）
材質、保護等級	ポリカーボネート、IP54準拠
寸　法	80（W）×160（H）×56（D）mm　（突起物含まず）
■ メインユニット	
ネットワーク機能	10BASE-T／100BASE-TX、RJ45コネクタ
警報機能	圧電ブザー
接点出力機能	無電圧タイプ、1接点、接点容量DC30V2A以下
電　源	DC6V（専用ACアダプタ）
バックアップ電源	3.6Vニッケル水素電池パック1本（動作時間：1時間程度）
動作温度	-10～60℃　（結露なきこと）
材質、保護等級	ポリカーボネート、IP54準拠
寸　法	135（W）×200（H）×50（D）mm　（突起物含まず）

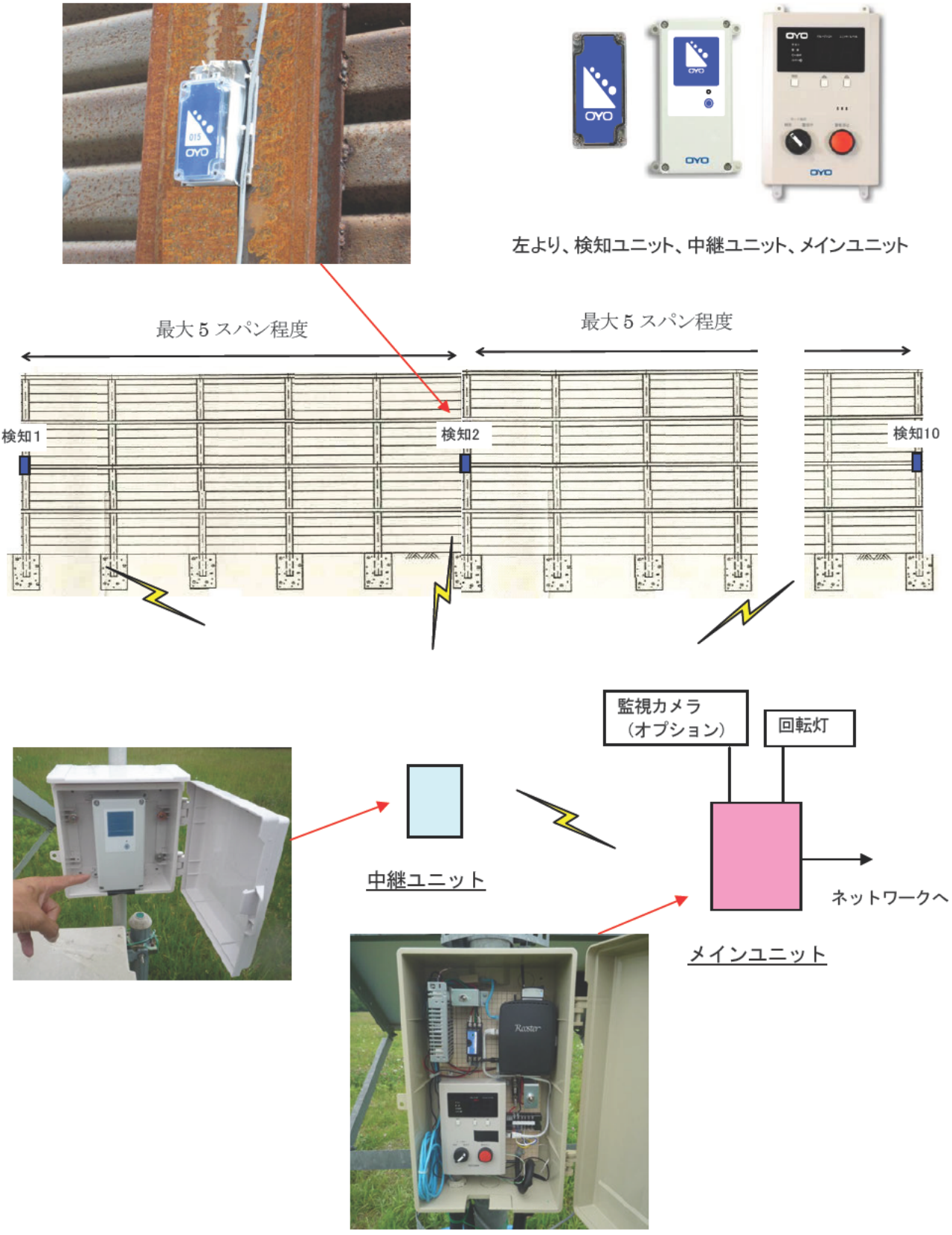


図 7.17　落石・崩落の発生のみを検知する崩落検知システムの構成、外観

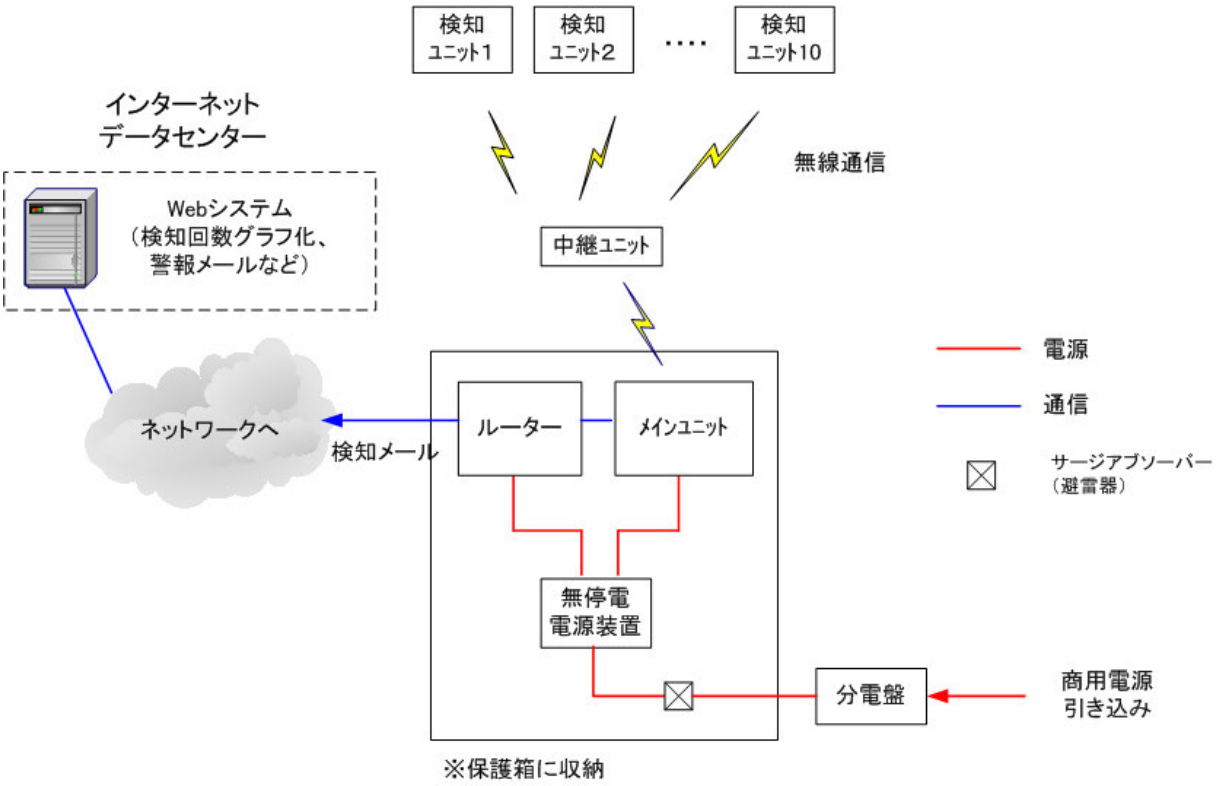


図 7.18　落石・崩落の発生のみを検知する崩落検知システムのブロック図

(2) 落石検知機構

図 7.19 に落石・崩落の発生のみを検知する崩落検知システムの検知フローを示す。

- 図に示すように検知ユニットは、微振動センサー（ボール接点方式、3 軸）と加速度センサー（MEMS 半導体ピエゾ抵抗、3 軸、）を用いた 2 段階の検知方式を採用している。この微振動センサー方式を採用したのは、微振動センサーによる ON/OFF の制御によって加速度センサーの消費電力を抑えるためである。
- 微振動センサーにより 30gal 以上の振動が検知された場合、加速度センサーは測定を開始する。加速度センサーによって測定された振動データは、デジタルフィルター（ハイパスフィルターとローパスフィルターの組み合わせ）により、防護柵の振動特性を踏まえて予め設定した周波数帯域（200～500Hz）によりフィルタリングされる。
- フィルターを通過した特定周波数の波形データを落石判別レベルである振幅レベル値（3 軸の合計値）およびレベル超過回数により比較し、振幅レベル値およびレベル超過回数が設定値より超過した場合に「崩落検知」として検出する。
- 検知ユニットの検知情報は、中継ユニットを介して、メインユニットに伝えられる。ここで、直後の 2 台目以降の検知ユニットからの検知情報は中継ユニット側で受信拒否し、不感知時間 10 秒間は受信待機する。このようにして、複数の検知センサーによる同一崩落の検知を防いでいる。言い換えれば、10 秒毎の検知＝崩落イベントとして扱う。

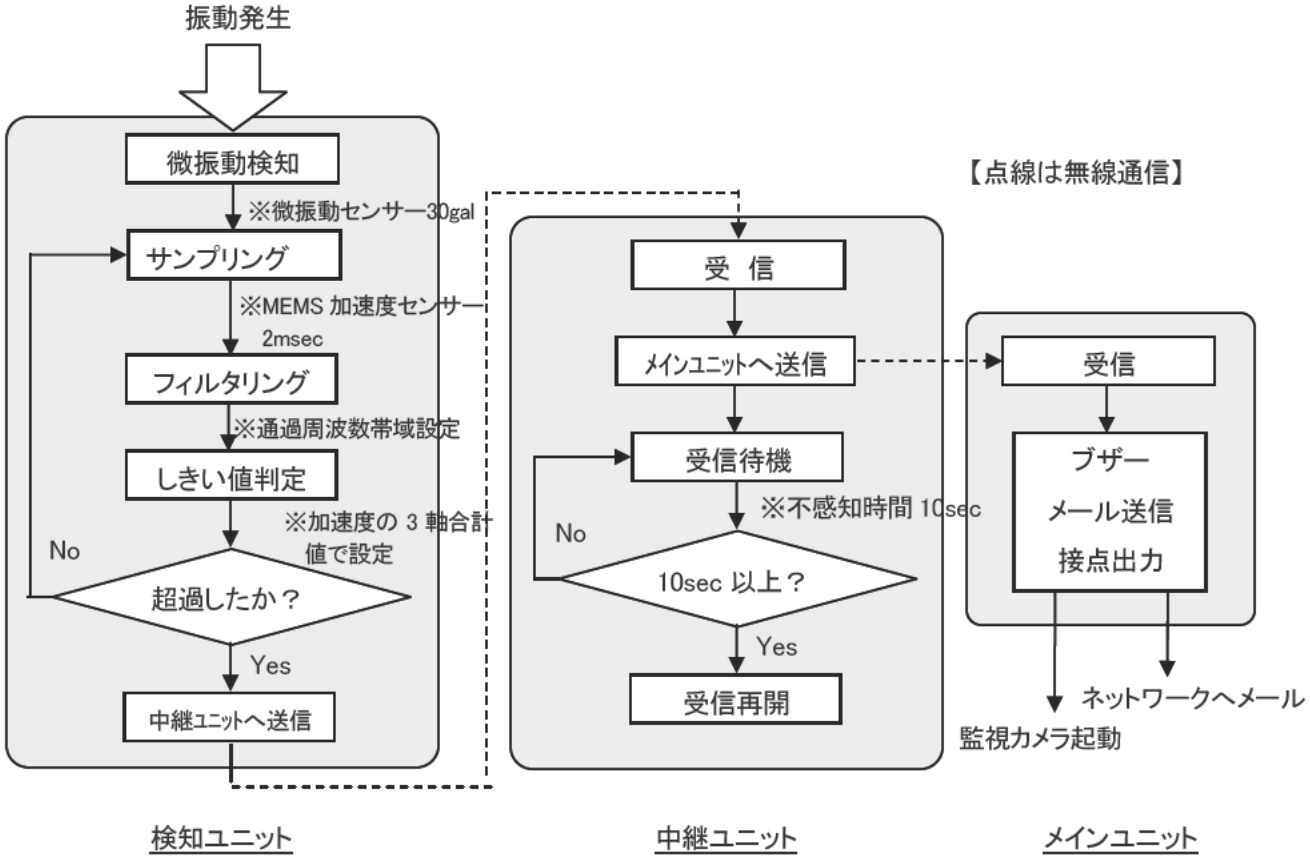


図 7.19　落石・崩落の発生のみを検知する崩落検知システムの検知フロー

⑶ システムの現地設置・調整

① システムの現地設置

図 7.20 にシステムの現地設置イメージを示す。

- 検知ユニットは図 7.20 上のように強力磁石が付いた専用プレートに取り付け、仮設防護柵の H 形鋼支柱に設置する。H 形鋼に取り付ける際、鋼材表面に凹凸がない場所に設置する。凹凸がある場合は、グラインダー等で平滑にする。検知ユニットの設置高さは 2m程度とする。
- 中継ユニットは図 7.20 左下のようにポリカーボネード製の保護箱に収納し、検知ユニット～メインユニット間の見通し（最大 200m程度）が取れる場所に設置する。距離が短い場合は、メインユニットと一緒に収納することも可能である。
- メインユニットは中継ユニットとの見通しが取れて、かつ安定電源（商用電源 AC100V など）やネットワーク環境が導入可能な場所に設置する。ネットワークは、NTT 回線を利用するか、あるいは携帯電話会社の無線パケット通信を利用する。図 7.20 右下は、携帯電話会社の無線パケット通信を利用した例で、無線パケット通信用のルーターと組み合わせている。

検知ユニットのＨ形鋼への取り付け例
（強力磁石が付いたプレートにユニットを固定）

中継ユニット設置例
（ポリカーボネード製の保護箱に収納）

メインユニット設置例
（ルーターの他、耐避器、商用電源の電圧
変換機を取り付けている）

図 7.20　落石・崩落の発生のみを検知する崩落検知システムの現場設置例

② システムの調整

- 検知ユニットの設定振幅レベルは、現地の交通振動・工事振動やその他の振動ノイズを別途用意した振動計（加速度計）で測定し、想定される落石による衝撃の大きさなどを考慮して現地で設定する。
- 検知ユニットの設置間隔は、設定振幅レベル相当の衝撃を仮設防護柵に擬似的に与え、2 箇所の検知ユニットいずれかが確実に検知できる間隔とする（実証実験等を踏まえると 3～5 スパンが望ましい）。擬似的な落石衝撃を与えるために、衝撃エネルギーが調整できる鉄球振り子やインパクトハンマーを利用する。鉄球を使った振り子方式衝撃実験の方法は、7.2.1 の速度型崩落検知システムの方法に準ずる。
- フィルタリングの設定周波数帯域は基本的に共同研究成果を踏まえ 200～500Hz とす

るが､念のため波形解析機能を有する振動計で設置対象の仮設防護柵の各種振動源（擬似落石や交通振動など）の周波数特性について調べることが望ましい。

- 具体的には、検知ユニット設置箇所と同じ箇所に振動計を取り付け、設置箇所から 3～5 スパン離れた横矢板を選んで振り子方式で鉄球により衝撃を付与する。衝撃時の振動データを FFT 解析によって、鉄球衝撃による仮設防護柵の固有周波数が 200～500Hz にあることを確認する。同時に、交通振動などの他の振動源の振動も測定し、他の振動源による固有周波数が 200～500Hz にないことを確認する。
- 設定した崩落検知システムの本番前テストとして、仮設防護柵へ衝撃を付与し、検知～ネットワーク通信までの一連の動作を確認する。
- 特定小電力無線の使用周波数帯は、現場周辺の他の簡易無線の周波数帯と合致する可能性がある。したがって、予め通信テストを行い、混線状況を確認する。

③ システムのチェック

- 検知ユニットや中継ユニットの電池切れやリンク切れの状態をメインユニットから警告メールとしてメール設定が可能である。この機能を利用して、一連のシステムの稼働状態を確認する。
- 定期的に検知ユニット取り付け箇所を叩き、Web 上の検知回数の増加傾向を見ることで、各ユニットの故障や Web システムの不具合の有無を確認する。
- この場合、現地確認により、打撃直後にブザー音と各ユニット番号がメインユニット上に表示されるとともに、Web システム上の検知回数も増えれば、システム上問題ない。
- 表示されないユニットがあればそのユニットを確認するとともに、現地確認で問題ないにも関わらず Web システム上の検知回数に変化がなければ､メインユニットのメール設定や通信機器を確認する。

(4) 検知データの取りまとめ

図 7.21 に検知データの取りまとめ例を示す。崩落検知システムから送信された検知情報（E メール）は応用地質㈱が運営するモニタリングデータ処理の汎用 Web システム上で収集され、時間当たりの検知回数、累積検知回数のグラフや一覧表として図化することが可能である。また、同 Web システム上では、任意単位時間当たりの目安値（検知回数）の設定に応じた警報メール送信も可能である。

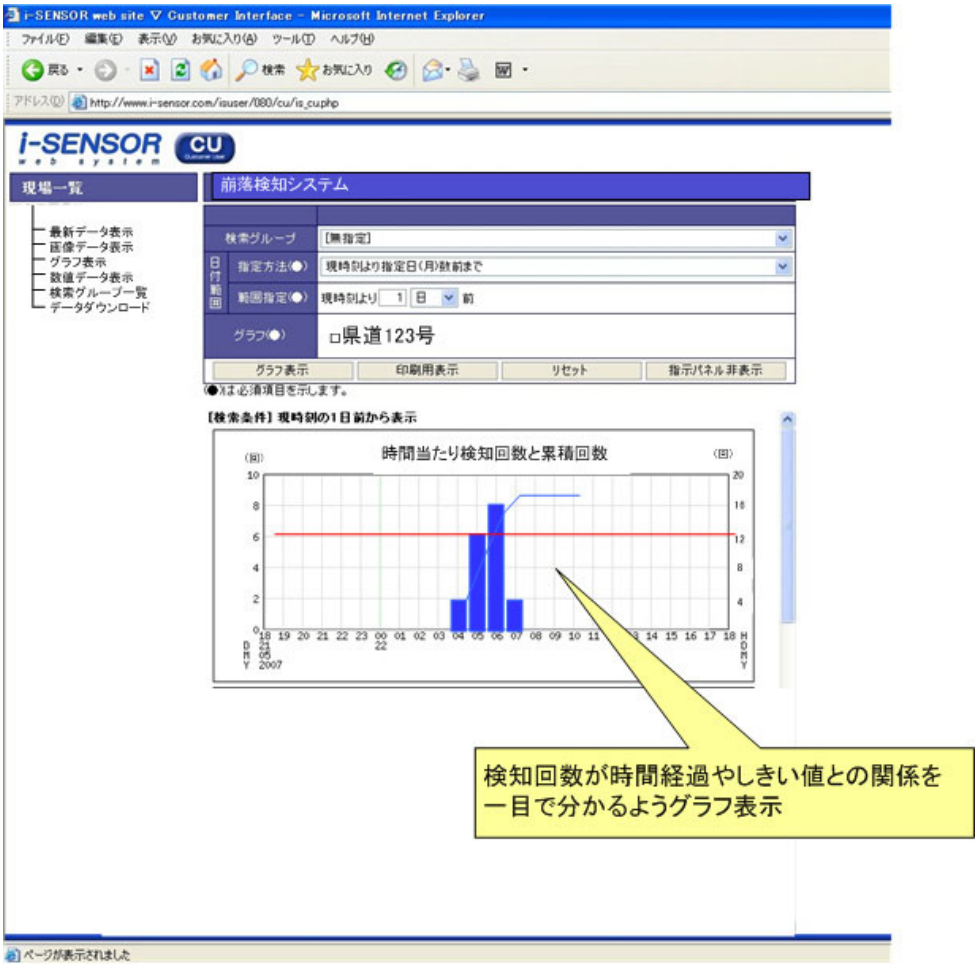


図 7.21　落石・崩落の発生のみを検知する崩落検知システムのデータ取りまとめ例
（検知回数の Web 表示例）

(5) 監視カメラの導入（オプション）

崩落検知システムに加えて、監視カメラを導入することは、落石・崩落状況の確実な検知や規模・範囲の確認、落石・崩落以外の振動源による検知といった誤認防止のためにも有用である。

監視カメラはネットワーク対応型で、今回の足尾での長期検証実験を踏まえると、次の機能があることが望ましい。

- 落石の大きさが視認できる画像サイズ（距離 10m でφ10cm の落石を視認するためには 640×480 程度の画像サイズが必要）
- 視認幅が比較的大きいこと（画角 45° 以上が望ましい）
- 崩落検知システムの接点出力をトリガーとしてカメラを起動するためのトリガー設定機能
- 落石の直前からの撮影が可能なプレトリガー機能（崩落前 2～5 秒程度）
- 照明との併用で夜間でも比較的鮮明に落石状況が撮影可能な感度（距離 10m でφ10cm の落石を夜間でも確認するためには、300W 程度の照明併用で被写体最低照度 0.005Lux 程度）

図 7.22 に監視カメラの設置位置の例を示す。監視カメラは仮設防護柵の内側で、防護柵延長方向を広く見渡せる箇所（防護柵上もしくは崩壊の可能性の低い斜面上）に設置する。また、道路側の交通振動がノイズになる可能性がある場合は、道路側にもカメラを設置することが望ましい。

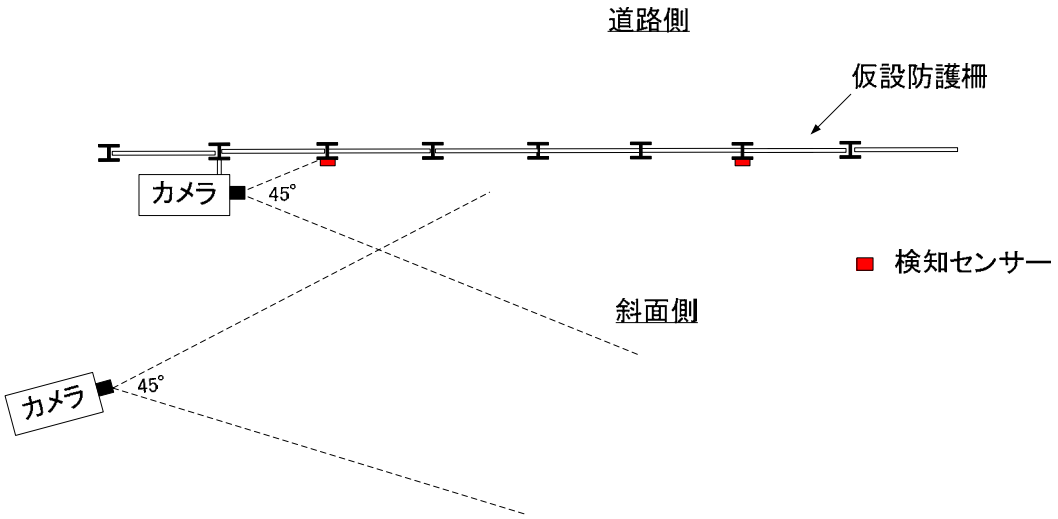


図 7.22　監視カメラの設置位置の例（設置平面図）

7.3 システム導入及び運用上の留意点

ここでは、速度型崩落検知システム（以後、速度システム）と加速度型崩落検知システム（以後、加速度システム）とに共通する留意点と、それぞれに独立した留意点について記載する。

7.3.1 システム導入時の留意点

(1) 電源の確保＜両システム共通＞

- 両方の検知システム共、「AC-100V」を必要とする。
- 電圧の変動や供給される電流の不安定さなど、電源品質は観測データの品質に直結する場合があるので、できるだけ品質の良い電源の確保に努める必要がある。
- 電源の品質が悪い場合は、安定化電源装置の導入を検討する必要がある。

(2) 通信環境の確保＜両システム共通＞

- 両方の検知システム共、通信環境の確保、すなわちインターネットへの接続は重要である。
- これは、観測データなどを遠隔地、例えば観測を受託した会社へ送信できることを意味しており、観測データの品質評価や再処理などが迅速に実施できることに加え、検知システムの稼働状況を遠隔地から診断し、必要があれば設定変更や再起動などの処置が可能となるからである。
- 通信環境が確保できない場合でも、崩落検知システムを稼働させることができるが、システムの稼働状況の確認や検知データの回収のために、以下の処置のいずれかが必要となる。

  A：観測システムを管理するために、観測員を定期／不定期に派遣する

  B：有人の事務所に検知システムを設置し、事務所職員が訓練を受けて、観測システムの管理を担当する

  C：事務所の職員は、毎日観測システムをチェックすると共にデータを回収し、受託会社に連絡／データを送信する

(3) 落石確認とノイズ除去＜速度システム＞

- 速度型地震計を使用した落石検知システムは、「振動波形」を記録すると共に、波形を自動処理する機能があるため、ある程度以上の精度で落石・崩落を検出することができる。
- 室内で振動波形記録を再生・確認することが可能であるため、落石由来かノイズかを最終確認することができる。しかし、工事振動や人工振動の中には極めて紛らわしいものもあるので、その精度は 100%ではない。

(4) 落石確認とノイズ除去＜加速度システム＞

- 加速度センサーを使用した崩落検知システムは、波形データを記録する機能を有しておらず、検知のみなので、落石由来であるかノイズであるかを波形データに基づいて判別することは不可能である。
- 一方、監視カメラを起動する信号を発生することができるため、監視カメラを導入することにより動画で振動発生源の確認を行い、ノイズである場合はそれを除去することが可能となる。
- 監視カメラの台数と視野を設定することにより、工事振動や自動車の振動を除去することが可能となるため、システム導入時において、監視カメラの必要性について検討する。

7.3.2 事前確認事項

(1) 仮設防護柵の振動特性の確認＜両システム共通＞

- 両方の検知システム共、原則として 200Hz～500Hz（600Hz）の周波数帯域のみ使用して落石の検知を行う。
- 落石検知システムを設置する予定の仮設防護柵の振動特性や距離減衰特性が、上記の周波数帯で問題がないかどうか、を確認するため、質量 1kg、2kg と 4kg の鉄球による振り子方式衝撃実験を行う。 それぞれの検知システムで行う実験の方法を以下に示す。

  A 速　度システム：「7.2.1 (3) ②（ⅱ）**振り子方式衝撃実験**」に準拠した衝撃実験

  B 加速度システム：「7.2.2 (3) ②（ⅱ）**振り子方式衝撃実験**」に準拠した衝撃実験

(2) ノイズの確認と除去＜両システム共通＞

- 検知システムの誤作動や誤検知の最大の原因が「ノイズの混入」である。
- 表 7.6 は、主なノイズとその除去方法の概要である。
- ノイズの確認・対処方法の典型的な手順を以下に示す。

  A：検知センサーを設置する予定の H 形鋼の高さに仮設置する。

  注） 加速度センサーの場合は波形を観測・記録できるシステムを仮設し、速度センサーの場合は実際に設置するセンサーを仮設する。

  B：工事に使用する予定の重機を稼働させて、振動を観測する。

  C：仮設防護柵が道路脇に設置されている場合、自動車の走行振動を観測する。最も重量のある自動車の試験走行が望ましいが、無理ならばある程度長時間待機して、実際に走行する自動車の振動を複数台数観測する。

  D：「B：」と「C：」の振動波形に対し、200Hz～500Hz（600Hz）のバンドパスフィルター処理を行って最大振幅値を求める。

E:「D」で求めたノイズ振幅が、想定最小落石振動値より小さければ問題はないが、大きい場合は適切な方法でノイズを除去する必要がある。

F：ノイズの除去が不可能な場合は、しきい値を大きくして対処することになるが、この場合小さな落石・崩壊を検出することができなくなる。

・ 工事のノイズを除去することができない場合は、その時間帯のデータ自体を排除するか、検知システムを休止させることで対処する。

表 7.6 主なノイズと除去の方法（再掲載）

種　類	主 な 原 因	留 意 点 や 対 策 方 法
電源ノイズ（速度システム）	電源･信号回線の微小なリーク	・検知システムをシャーシーをアースする ・入力の平衡バランサーの調整
雷（空電）ノイズ（速度システム）	雷放電	・除去はほぼ不可能なので、処理ソフトで除外する ・しきい値を上げることで対処できるが、小さな落石振動は検知できなくなるので留意が必要
工事振動など	特に掘削機、穿孔機	・工事誌などを入手して、後日比較検討する ・しきい値を上げることで対処できるが、小さな落石振動は検知できなくなるので留意が必要
自動車振動	高速走行や重量車	・200Hz～500Hzの周波数帯で、影響がないことを確認

7.3.3 システム稼働時の留意点

(1) 通信環境とシステムのチェック＜両システム共通＞

・ 両システムとも、原則としてインターネットを利用しているため、遠隔地（受託会社事務所など）から、記録器として使用する PC と通信することが可能である。

・ 検知システムやデータベースの状態が健全であるかどうか、を常に監視できるツールを導入して、システムの停止を極力無くすように努める。

・ 検知システムが故障した場合には、早期確認と復旧が重要であるため、検知システムを設置するに当たっては、原則として通信環境を整備する。

・ 通信環境が整備されていない場所では、「7.3.1 (2) **通信環境の確保**」に記述した方法に従って、検知システムの稼働状況を常にチェックする。

(2) 速度型崩落検知システムの留意点＜速度システム＞

・ 波形データと振動データベースをコピーし、「波形処理ソフトウエア」を起動して、検知した振動が落石・崩落であるか、ノイズであるかを判定する。

(3) 加速度型崩落検知システムの留意点＜加速度システム＞

・ 監視カメラを併用するシステムの場合は、記録されている画像（動画）を再生して落石・崩落であるか、ノイズであるかを判定する。

7.3.4 運用上の留意点

(1) 基本事項

・ 本システムは、ごく小規模の落石・飛石の防護機能のみが期待された仮設防護柵に、落石が複数回衝突する事象を計測の対象とし、現況では存在が認定されていない大規模な斜面変動の前兆を、間接的に捉えようとするものである。

・ 本システムの現地導入時、落石が想定される斜面と仮設防護柵の設置状況との組み合わせには様々なケースがあることが想定される。各箇所の実情に応じた安全性・信頼性の高い警戒体制を構築することが最も重要である。

・ このためには、システムの導入前の段階で、まず想定される落石の発生状況をできるだけ正確に把握し、当該個所の応急的な通行確保・施工時の安全確保の手段として仮設防護柵の設置が妥当であることを整理しておく必要がある。

・ 現場での注意喚起や通行規制の判断に使用する落石発生頻度の目安値については、十分に余裕を持った設定を行うことが望ましい。

・ また、実際の通行規制状況に応じて、本システム以外の複数の手法を併用して運用することが望ましい。

(2) 導入後の検知情報の使い方

・ 施工時の通行者の安全確保という仮設防護柵工の主目的を考慮すると、運用開始時点では暫定的な目安値を使用することも想定される。この場合、運用開始後に入手されるデータを十分に活用し、当該斜面の平常時の落石発生傾向を出来る限り正確に把握し、これから逸脱する現象を早期に検知するための資料とする。

・ 計測の結果、前兆の可能性のあるデータや、仮設防護柵の機能を上回る規模の落石等が検知された場合には、速やかに斜面の現状を再調査し、斜面崩落等につながる現象の有無、あるいは仮設防護柵の機能を明らかに上回る不安定な浮石や転石の分布等を確認する必要がある。

・ これらが確認された場合は、変動の機構や規模、大きく変動した場合の通行者への影響等に応じて、必要かつ最も有効な対応（応急対策の実施・監視体制の再構築等）をとることとする。

(3) 検知情報を踏まえた落石・崩落に対する警戒体制のあり方について

- 仮設防護柵の性格上、当該箇所での安全確保の基本は設置区間からの退避と立入の抑止である。本来であれば落石の危険性の高い斜面に対しては斜面の監視、発生源での抑制、落下地点での緩衝措置等、それぞれ複数の手法を併用して安全度の向上を図ることが理想的である。
- 仮設防護柵に衝突する落石の検知は、施設そのものの安全に直結する点でメリットがあり、夜間や悪天候時等の、目視による斜面状況の確認ができない条件下で落石検知が可能という強みもある。
- ただしこれらは別の観点でみると、単独で発生する大きなエネルギーの現象が作用した場合には、現象を検知した時点で施設が破損する恐れがあるほか、ネットやサンドクッション等の減勢や緩衝の措置を取った場合に正確な検知ができない等の課題を内包している。
- したがって通行の安全確保のためには、仮設防護柵の性能の限界を念頭に置きながら、落石やそれを前兆とする斜面変動発生時の最大の影響範囲を想定し、危険範囲内への立ち入りや通過を、空間的にも時間的にも最小にすることを意識する必要がある。
- システムで検知された情報は、イベントの発生頻度に着目するのは当然として、特に本システムで前兆現象の主体として想定しているような大規模な斜面変動の場合、落石の発生源の位置や落下方向、落石の規模そのもの等が経時的に変化することも十分あり得るので、情報を常に多面的に分析して必要な現地確認を行い、有効な警戒体制の構築につなげることが必要である。

8. まとめ

H 形鋼と鋼矢板などの土留材を組み合わせて用いられる仮設防護柵は、道路斜面の切土工事や法面工事に際して広く使用されている。これはあくまでも飛散防止を目的として用いられる場合が多く、実際に想定される斜面からの落石や斜面崩落を適切に考慮し、設計・設置されているケースは少ない。しかし、降雨や凍結融解、切土工事等で斜面の緩みが進行することにより、結果として適用範囲外の落石や斜面崩落が発生し、仮設防護柵が破壊する場合もある。この時、道路利用者は仮設防護柵より内側の状況を目視することができないため、大規模な落石や崩落の前兆現象として考えられる落石等の現象を把握することはできない。そこで、大規模な斜面変動の前兆現象と考えられる落石等が仮設防護柵の内側で発生した時にこれを的確に検知し、道路通行規制等により、車両通行等の被災を防ぐことが可能であると考えた。

このような背景のもと、本共同研究では、仮設防護柵周辺が無人となっても、仮設防護柵の内側で発生する大規模な斜面変動の前兆現象である小規模な落石を的確に検知し、斜面変動の危険性を情報として発信できるシステムの開発を目的として研究開発を進めた。主な検討項目は、仮設防護柵に容易に設置可能な検知センサーの検討、交通振動などをノイズとして分離し落石を検出するシステムの検討、常時微動を利用した不安定岩盤ブロック抽出技術（既往技術）の高度化、および大規模斜面変動の前兆となる落石頻度の目安値の検討である。これらの検討を行うために、土木研究所構内における振動特性把握のための基礎実験、交通振動との分離方法等を検討するための現道に設置された実物を用いての実験、さらには自然発生落石に対する検知性能や耐久性等の確認のための長期実証試験を通して種々の知見を得ることができた。これらの知見を反映させ、仮設防護柵への設置を前提とした加速度型振動計を用いたセンサーおよび速度型振動計を用いたセンサーの２タイプを開発した。また、大規模落石や斜面崩落の前兆となる落石頻度と頻度変化に関する検討を踏まえ、道路管理に際して大規模斜面変動の前兆となる落石頻度変化についての目安値を提案した。

以下に、本共同研究で開発した技術の概要をまとめる。

8.1　開発技術の概要

構築した検知システムは①測定機能、②A/D 変換機能、③演算処理機能、④通信・ネットワーク機能から構成される（図 8.1）。

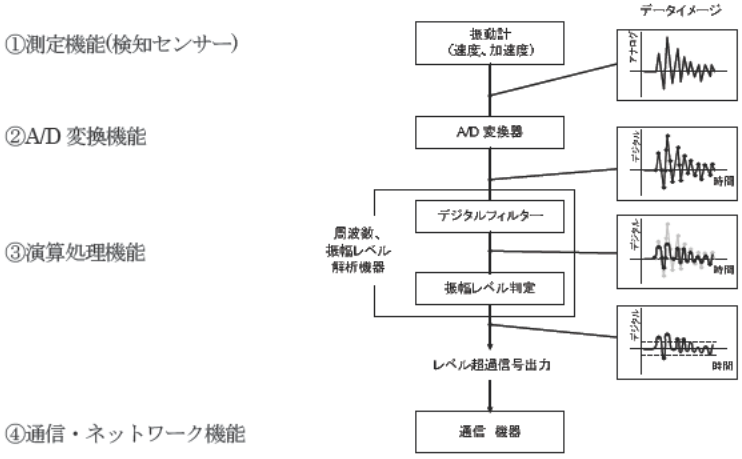


図 8.1　検知システムの概要

システムは、設置したセンサーが仮設防護柵の全ての振動をアナログ値として捉え、これを解析処理の可能なデジタル値へ変換した後、落石を確実に検知するためにデジタルフィルターでノイズを除去し振幅レベルや継続時間により落石を検出し、これを通信機器へ出力するという基本機構を有している。

また、システムの測定機能となる検知センサーは、動電式の①速度型振動計を用いたものと、圧電式の②加速度型振動計を用いたものの２タイプがあり、下記のような特徴がある。

①速度型振動計を使用した検知システム

落石・小崩落の検知に加えて、仮設防護柵への落石・崩落の規模や衝突位置の推定が可能である。

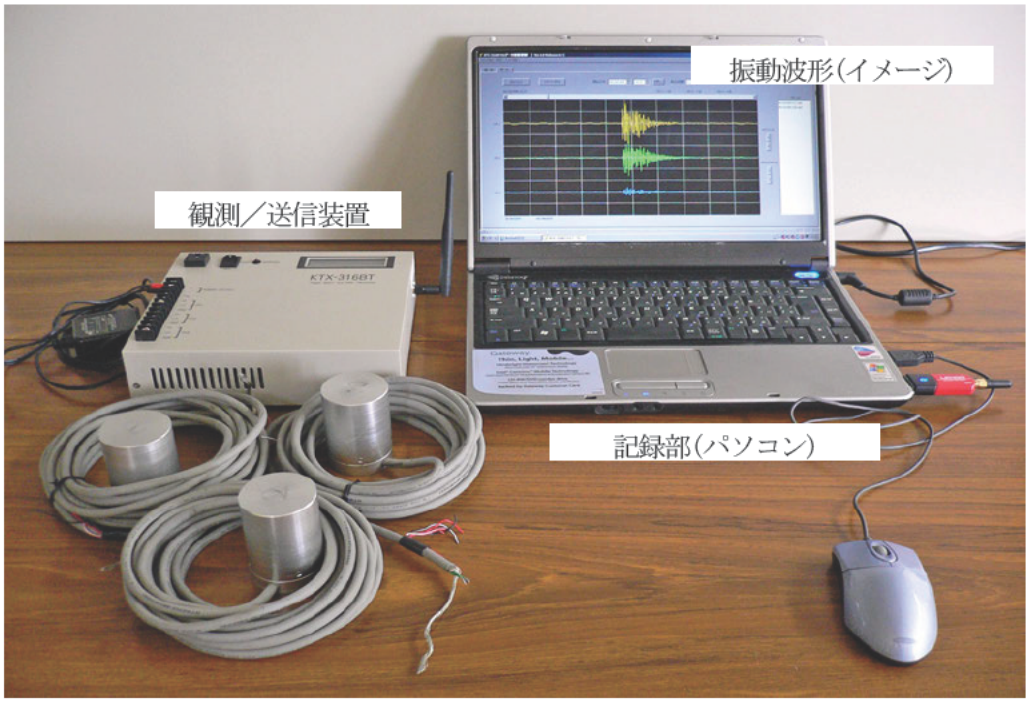


図 8.2 速度型振動計を使用した検知システム

（左から検知ユニット、中継ユニット、メインユニット）

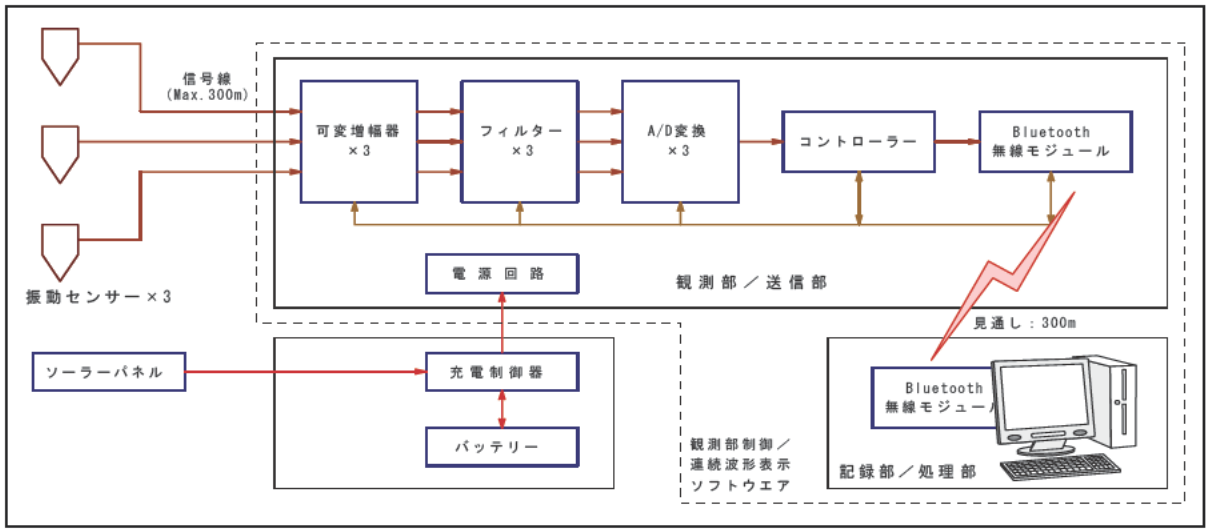


図 8.3　速度型振動計を利用した崩落検知システム概要図

センサーの種類により上記のような特徴を有するため目的に応じた適用が可能である。また、センサーは取り付けにボルトやマグネットを用いており、仮設防護柵への脱着が容易であるため夜間のみ

の設置や工事に伴う移設にも対応可能となっている。なお、これらのシステムの動作には商用電源が必要である。

②加速度型振動計を使用した検知システム

仮設防護柵への落石・崩落のみの検知が可能である。また、落石等の発生現象を視覚的に把握するため、補完として監視カメラの併用が可能である。

図 8.4 加速度型振動計を使用した検知システム
（左から検知ユニット、中継ユニット、メインユニット）

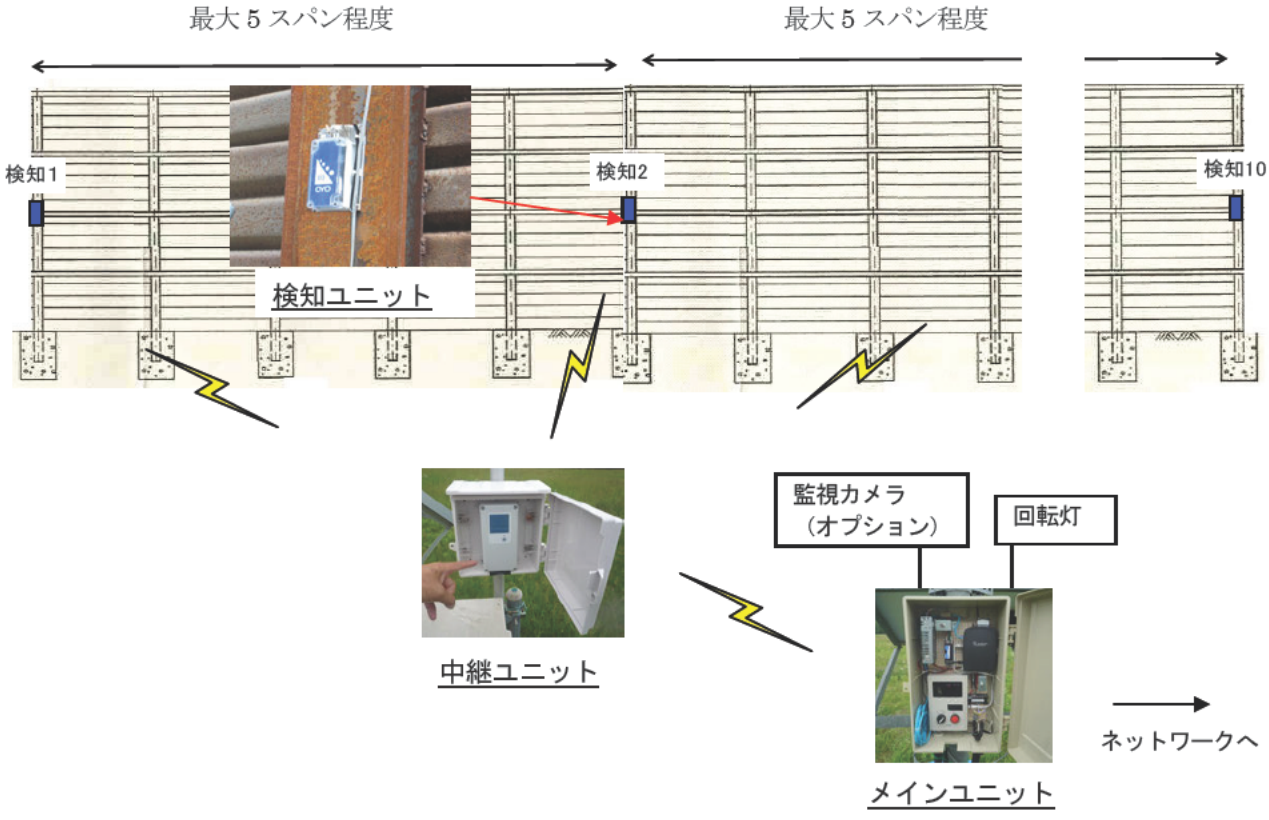


図 8.5　加速度型振動計を利用した崩落検知システム概要図

8.2 不安定岩盤ブロック抽出技術の高度化

本研究では不安定な岩盤ブロックの抽出を目的とし、落石の発生源と想定される岩盤に地震計を設置し振動計測を 2 時期に行った。1 回目の計測から 3 カ月が経過した後に 2 回目の計測を行い、計測結果の比較を行った。現段階では岩盤の不安定化の度合いやその危険度を示すまでには至っていないため、今回実施したような岩盤斜面の振動計測を行い、データを蓄積していくことで岩盤の不安定化を評価するための基礎資料になり得ると考える。

8.3 道路管理のための落石頻度に関する目安値

落石・小崩落の頻度から大規模な斜面変動を予測するため、今回は過去に観測が実施された３事例を対象とし、崩落に至るまでの間に発生した落石・小崩落の頻度を時系列的に整理し検討を行った。それぞれの事例は崩落のタイプが異なること、また地形や発生時の気象条件も異なることなどから、落石の総数、落石の累積傾向と大規模崩落までの時間の関係は異なっている。しかし、大規模な斜面変動に至る前に落石頻度が通常の発生頻度を逸脱する状態となることは共通していることから、目安値を提案した。ただし、検討事例は崩落に至った事例のみが対象となっており、他の現場においてはこの目安値を超過した後に必ず崩落に至るとは限らないほか、逆に目安値に達する前に崩落に至る場合もあると考えられる。

8.4 仮設防護柵に設置する斜面崩落検知システム運用マニュアル（試案）の作成

本研究で開発した仮設防護柵に設置する斜面崩落検知システムの運用マニュアル（試案）を別途作成し取りまとめた。作成したマニュアルをもとに全国的に試験運用がなされ、今後データの蓄積が進むことを期待する。

8.5 開発技術を活用した今後の展開

本共同研究では斜面の崩落の検知センサーと検出システムを開発した。検知センサーは目標とする機能をほぼ満足する機能を有するものが確立されたが、実証期間が約 4 カ月間であるため、今後試行的に多くの現場で実証を重ねて信頼性を高める必要があると考える。検出システムの中で崩落の前兆としての落石頻度に着目することにより設定した目安値については、崩落前の落石・小崩落を観測した事例が少なく検討が十分ではない。これは、斜面の地形や地質等によって目安値も異なる事が想定されるためである。今後多くの現場で検知センサーを設置することにより観測事例を増やし、それらの事例を地形・地質等で分類し、目安値の検討を行うことが必要である。

謝辞

本共同研究の実施に際し、試験地を提供下さいました群馬県藤岡土木事務所、相模原市、および国土交通省関東地方整備局渡良瀬川河川事務所の関係者の皆様方、また試験地の選定に際して情報や資料の提供を頂きました関係者の皆様方より多大なるご協力をいただきました。ここに記して厚く御礼を申し上げます。

参考資料

長期検証実験結果一覧

－足尾長期検証実験－

（１）速度型崩落検知システム

（２）加速度型崩落検知システム

速度型崩落検知システム　足尾長期実証実験 結果1(2010/12/10～2011/01/06)

No.	検出日時		ﾄﾘｶﾞ CH	継続時間 sec	周波数 Hz	最大 CH	ch1 mKine	ch2 mKine	ch3 mKine	ch4 mKine
1	2010/12/10	09:05	1	0.26	251	1	9.5	3.9	3.4	0.7
2	2010/12/11	13:12	3	3.66	251	3	1.8	5.1	6.5	1.4
3	2010/12/12	00:51	4	0.02	251	4	2.2	6.9	4.0	85.4
4	2010/12/12	00:51	2	3.68	251	2	7.9	10.7	9.4	1.5
5	2010/12/13	10:58	4	1.14	251	4	0.9	1.9	2.8	14.8
6	2010/12/13	13:37	3	3.67	251	3	0.9	5.7	7.0	0.7
7	2010/12/16	11:25	2	3.66	251	3	1.0	8.2	9.5	0.7
8	2010/12/17	11:39	3	1.94	209	3	0.8	29.5	108.0	0.6
9	2010/12/17	12:37	2	0.52	206	3	1.0	29.8	35.1	0.7
10	2010/12/18	10:24	3	0.43	199	2	1.2	90.5	90.1	11.6
11	2010/12/19	10:13	4	0.08	251	4	1.4	2.9	4.4	27.2
12	2010/12/20	12:41	2	3.67	251	2	1.0	4.1	3.4	0.7
13	2010/12/21	19:38	2	0.45	206	2	1.4	61.0	34.6	1.7
14	2010/12/22	00:34	3	1.82	197	2	8.8	293.8	84.2	11.8
15	2010/12/22	00:34	4	0.03	251	4	0.7	29.0	32.4	40.4
16	2010/12/22	14:58	3	0.37	251	3	0.6	5.4	19.2	0.5
17	2010/12/22	18:54	4	0.04	467	4	0.9	59.0	18.1	230.2
18	2010/12/22	21:43	2	0.30	206	2	0.7	56.7	36.7	0.5
19	2010/12/24	09:36	3	0.36	251	3	0.7	6.5	22.6	0.5
20	2010/12/25	10:27	3	3.67	251	2	1.0	10.9	8.4	0.8
21	2010/12/25	10:58	3	3.66	251	3	1.0	8.1	12.2	0.8
22	2010/12/26	11:06	2	3.60	251	2	1.2	13.4	5.2	0.9
23	2010/12/26	12:01	2	3.20	251	2	1.4	16.0	12.1	2.8
24	2010/12/26	13:11	2	1.07	195	2	3.2	63.9	19.9	2.1
25	2010/12/26	13:41	2	0.28	195	1	633.8	465.8	160.9	5.5
26	2010/12/27	11:57	2	3.65	250	2	1.3	8.7	8.4	4.2
27	2010/12/27	12:30	3	3.44	205	3	1.4	155.6	173.7	1.8
28	2010/12/27	12:36	3	2.01	204	2	2.8	651.5	648.4	1.7
29	2010/12/27	13:46	3	3.68	251	3	1.5	7.3	9.5	4.1
30	2010/12/27	13:48	2	0.95	251	2	1.8	21.8	7.7	1.3
31	2010/12/28	16:25	2	3.67	251	2	1.4	8.1	7.0	3.8
32	2010/12/28	16:53	4	0.06	251	3	1.5	50.4	110.9	31.5
33	2010/12/29	03:35	1	3.56	199	1	25.7	17.8	10.1	1.0
34	2010/12/29	06:09	2	0.26	250	2	7.0	22.0	9.2	1.0
35	2010/12/29	12:23	2	0.70	251	2	1.4	14.7	7.4	1.1
36	2010/12/31	12:12	2	0.36	251	2	1.6	64.1	33.3	4.1
37	2010/12/31	12:39	4	0.57	251	4	1.7	28.3	19.8	38.0
38	2010/12/31	13:28	3	2.67	251	3	1.8	8.1	19.7	1.6
39	2010/12/31	21:24	3	3.58	251	3	1.3	15.3	18.9	1.7
40	2010/12/31	21:50	2	0.28	251	2	1.3	48.0	14.5	1.2
41	2010/12/31	22:13	2	2.75	210	3	1.4	36.0	162.5	2.4
42	2010/12/31	23:33	3	3.68	251	2	1.2	12.9	7.4	0.9
43	2011/1/1	00:04	3	3.67	251	3	1.3	8.1	13.1	1.0
44	2011/1/1	10:19	3	1.95	193	3	2.1	117.6	211.2	1.5
45	2011/1/3	11:34	3	0.44	209	3	1.7	36.9	76.6	1.3
46	2011/1/3	17:34	3	0.39	251	3	1.3	45.9	52.1	1.0
47	2011/1/4	13:05	3	1.75	251	2	1.7	78.5	30.5	1.2
48	2011/1/5	15:44	3	0.26	225	2	2.3	282.9	240.4	1.1
49	2011/1/6	01:17	2	0.54	211	2	1.2	37.4	27.6	0.9

2011/01/12 ～ 2/22間停電のため欠測。

速度型崩落検知システム　足尾長期実証実験 結果2(2011/2/23～2011/03/11)

No.	検出日時		ﾄﾘｶﾞCH	継続時間 sec	周波数 Hz	最大CH	ch1 mKine	ch2 mKine	ch3 mKine	ch4 mKine
50	2011/02/23	10:23	2	4.08	244	2	9.4	370.0	277.4	23.2
51	2011/02/23	11:25	2	2.85	251	3	1.6	41.8	45.3	8.8
52	2011/02/23	22:25	3	0.27	564	3	1.4	71.2	370.8	1.2
53	2011/02/25	02:07	2	1.07	251	2	1.2	21.6	5.1	0.9
54	2011/02/25	20:34	2	2.00	211	2	1.1	29.8	11.8	0.9
55	2011/02/25	20:37	2	1.31	479	2	0.9	45.7	28.5	0.7
56	2011/02/25	21:56	2	0.27	251	2	0.9	41.7	9.6	0.8
57	2011/02/25	22:10	2	1.46	251	2	1.0	26.5	16.6	0.8
58	2011/02/25	23:48	2	0.28	562	2	1.3	176.4	36.5	3.9
59	2011/02/25	23:51	4	0.06	240	4	1.2	4.5	6.8	446.7
60	2011/02/25	23:52	3	3.67	251	3	1.2	7.7	9.1	1.6
61	2011/02/26	03:05	3	0.98	251	3	1.2	4.9	28.2	1.2
62	2011/02/26	03:12	3	3.48	251	3	1.3	4.2	21.2	1.0
63	2011/02/26	14:36	2	0.64	241	2	1.8	45.9	28.1	1.0
64	2011/02/28	04:30	2	0.40	207	2	1.4	62.7	37.7	8.4
65	2011/02/28	06:47	2	3.67	251	2	1.3	13.1	7.2	0.9
66	2011/03/01	08:35	3	0.40	190	3	1.7	171.6	328.5	74.6
67	2011/03/02	08:57	4	0.07	251	4	1.0	3.6	3.4	122.2
68	2011/03/02	09:51	2	0.37	210	2	1.7	61.6	29.4	9.6
69	2011/03/02	12:53	4	0.02	550	4	0.9	2.0	3.1	88.9
70	2011/03/03	04:47	2	3.67	251	2	1.5	32.1	9.4	4.5
71	2011/03/03	05:00	3	3.57	251	3	1.5	6.0	40.4	1.1
72	2011/03/03	07:16	2	0.16	251	2	1.5	23.5	6.0	1.1
73	2011/03/03	10:49	3	3.67	251	4	1.4	5.0	4.8	8.7
74	2011/03/03	20:40	2	3.40	251	2	1.5	19.7	6.1	2.2
75	2011/03/03	22:23	3	3.60	251	3	1.6	6.1	32.3	1.2
76	2011/03/03	22:36	2	0.66	251	2	1.5	20.1	9.1	1.2
77	2011/03/04	00:58	2	1.99	293	2	1.8	172.0	120.6	10.0
78	2011/03/05	13:10	2	0.98	251	2	1.9	30.5	19.7	1.4
79	2011/03/07	07:53	2	0.57	211	2	2.3	43.7	24.4	1.8
80	2011/03/07	14:31	4	2.95	204	3	5.6	822.8	1,201.3	31.8
81	2011/03/07	14:55	4	0.07	251	2	38.4	95.6	17.7	28.5
82	2011/03/07	15:12	3	3.50	255	2	1,157.2	1,416.2	1,008.1	30.0
83	2011/03/07	15:12	3	2.56	195	3	26.0	40.0	186.2	1.0
84	2011/03/07	16:13	2	0.49	192	2	29.1	47.6	29.3	0.9
85	2011/03/08	13:41	2	2.88	243	2	10.9	783.4	664.9	27.8
86	2011/03/09	09:40	2	0.11	344	2	3.5	268.6	59.5	3.5
87	2011/03/09	11:10	3	0.26	205	3	1.4	109.1	123.4	45.6
88	2011/03/09	11:41	3	0.53	251	3	1.4	4.7	35.5	1.1
89	2011/03/10	15:01	3	2.00	388	3	1.8	113.1	160.8	28.8
90	2011/03/11	14:48	2	0.25	246	2	1.7	78.9	69.5	1.9
91	2011/03/11	14:48	2	3.67	246	4	3.6	8.0	24.3	30.2
92	2011/03/11	14:48	3	3.40	247	3	3.9	77.0	175.3	11.8
93	2011/03/11	14:48	2	4.05	247	2	6.1	188.5	72.5	28.1
94	2011/03/11	14:49	3	3.67	248	2	3.5	35.9	12.9	9.7
95	2011/03/11	15:18	2	0.22	237	3	3.0	331.3	368.5	4.7

速度型崩落検知システム　足尾長期実証実験 結果(2011/3/12～2011/04/11)

No.	検出日時		ﾄﾘｶﾞCH	継続時間 sec	周波数 Hz	最大CH	ch1 mKine	ch2 mKine	ch3 mKine	ch4 mKine
96	2011/03/12	02:31	3	3.66	251	3	2.8	20.7	49.1	3.4
97	2011/03/12	03:21	2	3.67	251	2	2.9	39.3	11.4	2.7
98	2011/03/12	03:25	2	3.66	251	2	2.9	31.6	16.0	2.6
99	2011/03/12	16:23	3	3.66	250	3	2.9	12.5	35.0	2.1
100	2011/03/13	09:32	3	3.67	251	3	3.5	16.4	44.4	2.6
101	2011/03/13	10:05	2	2.08	550	2	8.1	124.9	48.0	2.6
102	2011/03/13	11:44	2	0.15	250	2	3.1	270.2	30.4	10.6
103	2011/03/16	09:27	2	0.20	251	2	1.7	67.3	28.0	1.0
104	2011/03/16	11:08	2	0.24	294	2	1.6	64.2	22.6	1.2
105	2011/03/19	10:59	3	0.50	282	3	1.9	43.9	186.1	1.4
106	2011/03/23	13:27	2	0.23	199	2	1.2	182.6	44.5	0.9
107	2011/03/23	13:57	2	1.89	547	2	2.2	274.8	94.9	1.3
108	2011/03/23	23:02	2	0.44	200	2	1.7	144.6	69.1	2.0
109	2011/03/24	02:00	2	0.31	251	2	1.5	73.6	24.5	1.1
110	2011/03/24	11:00	2	0.42	477	2	8.3	972.3	344.6	1.9
111	2011/03/26	11:22	2	0.67	282	2	2.2	74.1	25.1	1.2
112	2011/03/26	11:22	2	0.41	218	2	8.9	83.8	33.0	1.2
113	2011/03/26	11:23	3	3.68	251	2	1.5	12.6	10.0	1.1
114	2011/03/26	11:23	2	2.09	286	2	2.7	127.5	54.8	1.3
115	2011/03/26	11:27	2	0.31	198	2	17.0	329.4	143.6	1.4
116	2011/03/26	11:32	2	3.67	251	2	1.5	11.8	7.8	1.2
117	2011/03/26	13:31	4	0.03	251	4	1.7	6.8	6.8	119.9
118	2011/03/27	03:16	2	2.44	523	2	4.9	1,241.5	1,225.1	4.7
119	2011/03/27	19:59	3	3.56	238	3	4.2	457.6	1,326.3	369.1
120	2011/03/28	10:39	2	0.33	198	2	10.4	159.1	45.7	1.7
121	2011/03/28	13:09	2	0.59	251	2	2.5	65.2	18.4	2.2
122	2011/03/28	14:43	2	0.28	251	3	2.9	334.4	1,135.3	1.8
123	2011/03/28	14:44	2	0.26	314	2	4.7	196.8	32.0	1.6
124	2011/03/30	06:25	4	0.02	250	4	2.6	5.4	9.3	113.9
125	2011/03/30	19:08	2	0.86	249	2	4.6	119.5	41.5	1.5
126	2011/03/30	19:52	4	3.59	195	4	1.9	49.8	21.2	68.4
127	2011/03/31	18:04	2	0.27	189	2	4.6	798.8	125.1	8.5
128	2011/04/01	09:36	3	0.24	251	3	1.6	22.3	59.0	1.2
129	2011/04/01	10:36	4	0.40	274	4	1.8	6.0	12.2	93.7
130	2011/04/01	13:15	3	0.26	285	3	2.2	115.7	453.9	1.2
131	2011/04/01	16:31	3	0.84	208	3	2.3	72.7	117.4	8.7
132	2011/04/02	15:35	3	0.50	251	3	1.8	54.4	62.6	1.5
133	2011/04/02	16:10	3	0.50	251	3	1.8	34.2	44.6	1.4
134	2011/04/04	12:41	3	0.34	251	3	2.2	118.9	141.9	2.1
135	2011/04/06	16:40	2	0.30	251	2	2.8	115.2	22.7	2.3

2011/04/07～システムトラブルのため欠測。

加速度型崩落検知システム　足尾長期検証実験　検知イベント時の監視カメラ状況、検証用振動計による識別結果１

崩落検知センサイベント検知期間	崩落検知センサ検知		監視カメラによる確認状況							検証用振動計による最大加速度振幅(m/s^2)				速度型振動計による検知状況
	イベント数	累積回数	カメラ画像	カメラ音声	落石タイプ	最初の打撃スパン	打撃スパン	落石個数	備考（直径φはセンチ）	トリガー時刻	振動計1	振動計2	振動計3	
2011/2/23　10:20～30	2	2	○	○	複数	3	全	10以上	φ10以上	10:23:40	550.0	69.4	92.3	○
										10:23:46	20.9	18.9	68.3	
2011/2/23　11:20～30	2	4	○	○	複数	3	2～4	10以上	φ5ぐらい？	11:25:47	11.2	4.6	2.2	○
2011/2/23　12:30～40	1	5	○	○	単発	2	2	1	φ5以下	12:32:29	6.8	1.2	0.9	
2011/2/23　22:20～30	1	6	○	○	複数	5	5	10以上	φ10以上、大半到達せず	22:25:33	62.7	48.5	399.3	○
2011/2/25　2:00～10	2	8	○	○	単発	1？	1～2	2	φ5以下	2:07:41	36.8	61.9	16.6	○
2011/2/25　10:10～20	1	9	○	○	単発	1？	1？	1	φ5以下	10:15（カメラ）				
2011/2/25　20:30～40	2	11	○	○	単発	3	3	1	φ5くらい	20:34:08	57.7	22.0	10.8	○
										20:37:06	24.9	17.8	15.5	
2011/2/25　21:50～22:00	1	12	○	○	複数	3	2～3	10以上	φ5くらい	21:56:05	23.0	7.7	2.6	○
2011/2/25　22:00～10	4	16	×	○	複数	？	？	？	φ5以下？	22:08:49	10.5	1.8	9.8	○
										22:08:56	7.7	4.5	40.8	
										22:09:03	9.0	1.2	0.9	
										22:10:39	26.1	26.5	25.4	
2011/2/25　23:30～40	5	21	×	×	複数	？	？	？	φ5以下？	23:35:05	2.5	1.4	5.0	
										23:35:48	4.0	0.8	0.9	
										23:36:09	4.1	4.2	8.0	
2011/2/25　23:40～50	11	32	○	○	複数	2,3？	2～3	複数	φ5以下	23:40:20	6.4	5.4	3.5	○
										23:44:48	9.4	6.5	4.3	
										23:45:04	3.5	0.8	0.9	
2011/2/25　23:50～0:00	2	34	○	○	複数	2、他	2、他	1	φ5以下？	23:50:58	8.2	2.1	9.3	○
										23:51:04	22.5	3.9	3.2	
										23:51:14	7.3	1.1	1.3	
2011/2/26　0:00～10	3	37	×	×	複数	？	？	？	φ5以下？	0:02:21	5.0	1.3	0.9	
										0:02:34	3.0	0.8	0.9	
										0:11:38	6.8	1.8	1.0	
2011/2/26　0:10～20	1	38	×	○	複数	？	？	？	φ5以下？	1:03（カメラ）				
2011/2/26　1:00～10	1	39	○	○	複数	3？	3？	1	φ5以下、大半到達せず	1:04:24	3.6	0.8	0.9	
2011/2/26　1:30～40	1	40	○	×	複数	3？	3？	？	φ5以下	1:39（カメラ）	3.5	1.2	0.9	
2011/2/26　2:50～3:00	1	41	○	○	複数	3	2～3	複数	φ5以下、大半は到達せず	2:59:29	2.5	0.8	6.4	
2011/2/26　3:00～10	3	44	○	○	複数	3？	3	2	φ5以下	3:05:29	4.9	2.8	2.2	○
										3:05:41	2.5	0.8	9.4	
2011/2/26　3:10～20	2	46	×	×	複数	？	？	？	φ5以下？	3:11	2.5	0.8	4.8	○
										3:12:23	2.5	0.8	8.9	
										3:18:17	2.5	0.8	5.0	
2011/2/26　14:30～40	1	47	○	○	複数	1？	1？	複数	カメラの支柱に当たった？	14:36:00	74.1	7.9	6.5	○
2011/2/26　17:40～50	1	48	○	○	単発	1	1	1	φ5以下	17:44:48	49.6	3.7	2.3	
2011/2/27　8:30～40	1	49	○	○	単発	1	1	1	φ5以下、カメラ支柱	8:35:26	14.1	1.1	0.9	
2011/2/28　4:20～30	1	50	○	○	複数	4	3～4	10	φ5～10	4:30:31	30.5	31.3	19.2	○
2011/2/28　6:40～50	1	51	×	○	複数	1	1	10	φ5以下、カメラ支柱	6:46（カメラ）				○
2011/2/28　8:50～9:00	1	52	○	○	複数	3	3～5	10以上	φ5～10、大半は到達せず	8:50:14	2.6	1.1	14.1	
										8:50:55	2.5	0.8	4.9	
										8:52:32	2.8	1.2	13.1	
2011/3/1　8:30～40	2	54	○	○	複数	5	2～5	10以上	φ10～、大半は到達せず	8:35:26	69.0	73.9	550.0	○

加速度型崩落検知システム　足尾長期検証実験　検知イベント時の監視カメラ状況、検証用振動計による識別結果２

崩落検知センサイベント検知期間	崩落検知センサ検知		監視カメラによる確認状況							検証用振動計による最大加速度振幅（m/s^2）				速度型振動計による検知状況
	イベント数	累積回数	カメラ画像	カメラ音声	落石タイプ	最初の打撃スパン	打撃スパン	落石個数	備考（直径φはセンチ）	トリガー時刻	振動計1	振動計2	振動計3	
2011/3/1　12:40～50	1	55	○	○	複数	4	3～5	10ぐらい	φ5以下、大半は到達せず	12:49:02	4.4	2.9	16.9	
2011/3/1　13:20～30	1	56	○	○	単発	？	？	？	？	13:28:43	9.1	0.8	0.9	
2011/3/2　9:00～10	4	60	○	○	単発	1	1	1	φ5以下	9:04:26	3.0	0.8	0.9	
										9:05:21	21.7	1.7	1.0	
2011/3/2　9:50～10:00	1	61	○	○	複数	2	1～3	10ぐらい	φ5以下、大半は到達せず	9:51:42	92.9	53.4	22.4	○
2011/3/2　20:10～20	1	62	○	○	単発	3	3	1	φ5以下	20:13:49	13.9	7.9	2.5	
2011/3/2　20:30～40	1	63	○	○	単発	？	？	？	φ5以下？	20:30:13	6.8	5.6	8.8	
2011/3/3　4:40～50	2	65	×	×	複数？	1？	？	？	φ5以下？	4:47:41	12.4	4.4	4.9	○
										4:47:48	3.9	0.8	0.9	
2011/3/3 5:00～5:10	2	67	×	×	複数？	？	？	？	φ5以下？	5:00:10	2.7	1.4	19.2	○
										5:00:16	15.0	4.1	2.6	
2011/3/3　7:10～20	1	68	×	×	？	？	？	？		7:16:51	5.7	4.1	1.8	○
2011/3/3　10:50～11:00	2	70	○	×	単発	2	2	1	φ5以下	10:50:03	3.7	1.0	1.0	○
2011/3/3　12:00～10	1	71	×	○	単発	？	？	？	φ5以下？	12:10（カメラ）				
2011/3/3　14:00～14:10	1	72	○	○	複数	1と2間支柱	1～2	10	φ5以下、大半は到達せず	14:01:44	6.4	1.3	0.9	
2011/3/3　19:50～20:00	1	73	×	○	単発	？	？	？	φ5以下	19:52:25	6.0	1.9	0.9	
2011/3/3　20:10～20	1	74	○	○	単発？	？	？	？	φ5以下？	20:18:47	3.0	0.8	0.9	
2011/3/3　20:30～40	1	75	○	○	複数？	？	？	？	φ5以下？	20:40:56	3.3	2.4	0.9	○
2011/3/3　20:50～21:00	1	76	×	○	複数？	？	？	？	φ5以下？	21:00（カメラ）				
2011/3/3　22:00～10	1	77	○	○	単発？	？	？	？	φ5以下？	22:06:03	31.6	3.4	1.6	
2011/3/3　22:20～30	2	79	×	○	複数？	？	？	？	φ5以下？	22:23:26	2.5	1.1	15.5	○
										22:24:56	20.7	19.8	7.7	
2011/3/3　22:30～40	1	80	×	○	単発？	？	？	？	φ5以下？	22:36:09	17.3	3.7	1.2	○
2011/3/4　00:50～1:00	1	81	○	○	複数	3	2～5	10以上	φ5～10	0:58:26	83.5	44.6	284.0	○
2011/3/5　9:20～30	1	82	○	○	単発	4	4	2	φ5以下	9:23:57	15.5	5.3	16.4	
2011/3/5　9:50～10:00	1	83	○	○	単発	1	1	1	φ5以下	9:53:55	5.0	0.8	0.9	
2011/3/5　11:50～12:00	1	84	○	○	単発	4	4	1	φ5以下	11:59:26	12.4	6.8	16.1	
2011/3/5　13:30～40	1	85	○	○	複数	1と2間支柱基礎	1～3	10個以下	φ5以下、大半は到達せず	13:37:52	4.3	2.3	3.1	
2011/3/6　9:30～40	1	86	○	○	複数	3	3～4	10	φ5以下、大半は到達せず	9:36(カメラ)				
2011/3/6　10:40～50	1	87	○	○	単発	3	3	1	φ5以下	10:49:52	9.8	3.0	1.5	
2011/3/6　11:50～12:00	1	88	○	○	複数	5?	5？	10くらい？	φ5以下	11:55:55	7.2	1.2	1.4	
2011/3/7 7:50～8:00	1	89	○	○	単発	2	2	2	φ5以下	7:53:16	63.2	23.0	13.5	○
2011/3/7　8:20～30	1	90	○	○	複数	3	3～5	10程度	φ5以下	8:22:03	16.8	10.4	10.8	
										8:28:28	3.3	0.9	0.9	
2011/3/7　14:30～40	2	92	○	○	複数	4	全体	多数	**φ20～30、スパン4防護柵破損**	14:31:53	209.8	130.3	550.0	○
										14:31:00	550.0	141.8	111.9	
										14:39:28	3.0	0.8	0.9	
2011/3/7　14:50～15:00	1	93	○	○	単発	2	2	2	φ5くらい	14:55:40	46.9	23.0	13.2	○
2011/3/7　15:10～15:20	2	95	○	○	複数	5	全体	複数	**φ20～50**	15:12:23	550.0	550.0	424.7	○
										15:12:29	109.6	111.2	550.0	
2011/3/7　16:10～16:20	1	96	○	○	単発	3	3	3	φ5くらい	16:13:20	30.9	49.5	28.4	○
2011/3/7　21:50～22:00	1	97	○	○	複数	4？	4～5？	10くらい	φ5以下、大半は到達せず	21:58:34	4.5	3.6	4.0	
2011/3/8　10:00～10:10	1	98	○	○	単発	4	4	1	φ5くらい	10:09:16	12.6	11.9	27.1	

加速度型崩落検知システム　足尾長期検証実験　検知イベント時の監視カメラ状況、検証用振動計による識別結果３

崩落検知センサイベント検知期間	崩落検知センサ検知		監視カメラによる確認状況							検証用振動計による最大加速度振幅（m/s^2）				速度型振動計による検知状況
	イベント数	累積回数	カメラ画像	カメラ音声	落石タイプ	最初の打撃スパン	打撃スパン	落石個数	備考（直径φはセンチ）	トリガー時刻	振動計1	振動計2	振動計3	
2011/3/8　11:00～11:10	1	99	○	○	単発	1	1	1	φ5以下	11:07:15	104.3	10.1	5.7	
2011/3/8　11:20～11:30	2	101	○	○	複数	1	1	10くらい	φ5以下	11:24:21	3.9	2.6	17.5	
										11:26:24	17.6	2.1	3.0	
2011/3/8　11:20～11:30	1	102	○	○	単発	3？	3?	10くらい	φ5以下	11:38:09	5.8	5.8	8.0	
2011/3/8　12:30～40	1	103	○	○	単発	5	5	1	φ5以下	12:35:14	6.3	3.9	26.7	
2011/3/8　13:00～13:10	1	104	○	○	複数	1	1	5くらい	φ5以下	13:02:05	10.0	4.7	5.3	
2011/3/8　13:40～50	4	108	○	○	複数	3	3	10くらい	φ5～20	13:41:12	225.8	304.0	98.6	○
2011/3/9　9:40～50	2	110	○	○	複数	2	2～4	10以上	φ5～10	9:40:33	214.6	114.1	47.1	○
										9:40:39	30.9	11.0	6.2	
2011/3/9　11:10～20	1	111	○	○	複数	4	3～4	5くらい	φ5～10	11:10:37	37.6	23.0	45.2	○
2011/3/9　11:40～50	1	112	○	○	複数	4	3～5	5くらい	φ5以下、大半は到達せず	11:41:42	3.6	2.1	15.3	○
2011/3/10　15:00～10	1	113	○	○	複数	3	3～5	10くらい	φ5以下	15:01:25	35.0	47.5	87.1	○
										15:07:52	4.1	2.3	5.4	
										15:07:59	3.9	2.2	2.3	
2011/3/10　16:00～10	1	114	×	○	単発	?	?	?	φ5以下？	16:00:36	7.5	5.8	3.9	
2011/3/10　20:00～10	1	115	○	○	複数	1	1	複数	φ5以下、大半は到達せず	20:08:14	61.5	6.9	6.3	
2011/3/10　23:10～20	1	116	○	○	複数	2	2	複数	φ5以下、大半は到達せず	23:12:25	9.4	1.6	0.9	
2011/3/11　8:30～40	1	117	○	○	複数	1と2間の支柱	1	10	φ5以下、大半は到達せず	8:34:02	4.2	0.8	0.9	
2011/3/11　14:40～50	8	125	○	○	複数	?	全体	複数	**φ10～20、東日本大震災**	14:48:17	32.9	35.8	81.8	○
										14:48:28	18.1	11.7	3.8	
										14:48:46	183.5	209.8	66.0	
2011/3/11　15:00～15:10	2	127	○	○	複数	?	全体	複数	**φ10～20、東日本大震災**	15:01:46	18.7	2.9	1.2	
										15:01:53	3.1	1.1	2.1	
2011/3/11　15:10～20	1	128	○	○	複数	?	全体	複数	φ10前後	15:18:15	42.1	31.4	65.2	○
2011/3/12　02:30～40	2	130	×	○	単発	?	?	複数	φ5以下？	2:31:11	9.62	6.02	53.44	○
										2:34:13	6.48	2.28	1.12	
2011/3/12　03:20～30	2	132	×	○	複数	?	?	複数	φ5以下？	3:21:41	11.1	5.98	1.92	○
										3:25:04	5.02	1.91	0.64	○
2011/3/12　16:20～30	1	133	×	○	単発	5?	5?	?	φ5以下？	16:23:25	7.74	6.2	28.34	○
2011/3/13　09:30～40	2	135	○	○	単発	5?	5	5くらい	φ5以下	9:32:47	9.44	5.58	57.3	○
2011/3/13　10:00～10	2	137	○	○	単発	1	1～3	5くらい	φ5以下	10:05:47	471	50.34	35.56	○
										10:05:53	63.02	15.6	14.4	
2011/3/13　11:40～50	1	138	○	○	単発	3と4間の支柱	←	1	φ5くらい	11:44	89	74.04	32.06	○
2011/3/16　09:20～30	1	139	×	○	単発	?	?	1	φ5以下？	9:27:24	26.36	5.14	4.18	○
2011/3/16　11:00～10	1	140	○	○	単発	4	4	1	φ5以下	11:08	27.78	100.24	33.32	○
2011/3/19　10:50～11:00	1	140	計画停電の影響で監視カメラシステム停止							10:59:55	35.1	21.1	208.96	○
2011/3/23　13:20～30	1	141								13:27:26	34.3	25.18	13.58	○
2011/3/23　13:50～14:00	1	141								13:57:09	43.6	33.86	34.56	○
2011/3/23　23:00～10	2	143								23:02	47.82	19.64	8.84	○
2011/3/24　02:00～10	1	142								2:00:42	26.94	20.54	19.76	○
2011/3/24　11:00～10	1	144								11:00:05	422.52	227.54	103.42	○

加速度型崩落検知システム　足尾長期検証実験　検知イベント時の監視カメラ状況、検証用振動計による識別結果４

崩落検知センサイベント検知期間	崩落検知センサ検知		監視カメラによる確認状況							検証用振動計による最大加速度振幅（m/s^2）				速度型振動計による検知状況
	イベント数	累積回数	カメラ画像	カメラ音声	落石タイプ	最初の打撃スパン	打撃スパン	落石個数	備考（直径φはセンチ）	トリガー時刻	振動計1	振動計2	振動計3	
2011/3/26　11:20～30	5	149	計画停電の影響で監視カメラシステム停止							11:22:17	84.3	12	7.06	○
										11:22:52	550	28.66	21.34	○
										11:23:17	33.98	2.1	1.76	○
										11:23:37	148.96	24.9	11.7	○
										11:27:14	291.68	42.22	28.22	○
2011/3/26　11:30～40	1	150								11:33:03	70.06	4.6	3.54	○
2011/3/26　13:30～40	1	151								13:32:47	36.6	5.08	3.24	○
2011/3/27　03:10～20	1	152								3:16:43	341	550	550	○
2011/3/27　19:50～20:00	2	154								19:59:50	80.98	173	550	○
2011/3/28　10:30～40	1	155	×	○	単発	？	？	1	？	10:39	550	43.6	28.18	○
2011/3/28　13:00～10	2	157	○	×	単発	3	3	2～3	φ5以下	13:09	70.76	28.86	21.56	○
2011/3/28　14:40～50	ー		×	×	ー	ー	ー	ー	工事車両による影響？	14:43	321.8	26.78	13.3	○
2011/3/30　06:20～30	2	159	○	○	単発	2	2	1	φ10（柵にはぶつからず）	6:25:42	4.28	1.82	1.8	○
2011/3/30　19:00～10	1	160	×	○	複数	？	？	複数	φ5～10、大半は到達せず	19:08:59	282.28	27.06	13.06	○
2011/3/30　19:50～20:00	1	160	×	○	複数	？	？	複数	φ5以下、大半は到達せず	19:53:00	18.98	10.26	3.7	○
2011/3/31　18:00～10	1	161	○	○	複数	2～3支柱	3	複数	φ5～10、大半は到達せず	18:04:49	255.6	177.02	*0.44*	○
2011/4/01　09:30～40	2	162	○	○	単発	4	4	単発	φ5以下	9:36:12	17.26	28.5	*0.24*	○
2011/4/01　10:30～40	3	164	○	○	単発	5	5	10ぐらい	φ2～3	10:36:54	4.72	1.92	*0.26*	○
2011/4/01　13:10～20	1	163	○	○	複数	5	5	10ぐらい	φ5～10、大半は到達せず	13:15:51	50.86	31.16	*0.28*	○
2011/4/01　16:30～40	1	165	○	○	単発	2	2	2～3	φ5以下	16:31:51	186.54	54.92	*0.22*	○
2011/4/02　15:30～40	1	164	○	○	単発	4	4	2～3	φ5以下	15:35:52	14.46	14.8	*0.2*	○
2011/4/04　12:40～50	1	166	○	○	単発	4	4	10くらい	φ5以下	12:41:52	15.66	10.6	*0.3*	○
2011/4/06　16:40～50	1	165	○	○	複数	5	2,5	10くらい	φ5以下	16:40:41	19.04	9.36	*0.26*	○
2011/4/9　4:40～50	1	166		○	複数	－	－	2～3	－	4:41:32	3.16	0.52	*0.16*	
2011/4/9　8:10～20	1	167	○	○	単発	1	1	20くらい	φ5以下	8:13:01	38.2	4.4	*2.44*	
2011/4/11　21:50～00	1	167	夜間	○	単発	－	－	1		21:55:05	6.34	0.84	*0.44*	
2011/4/12　10:50～00	1	168	○	○	単発	2	2	1	φ10程度	10:50:30	38.92	14.66	*-6.86*	
2011/4/13　10:30～40	1	168	○	○	複数	3	3	2	Φ5程度	10:39:09	6.55	1.08	*0.68*	
2011/4/13　11:50～00	1	169	○	○	複数	4	4	5くらい	Φ5以下	11:57:38	1.58	0.46	*-1.06*	
2011/4/13　12:30～40	1	169	○	○	複数	4	4	5くらい	Φ5以下	12:30:23	11.9	43.76	*11.1*	
2011/4/13　13:10～20	1	170	○	○	単発	2	2	2	Φ5以下	13:14:26	3.98	3.32	*3*	
2011/4/13　21:50～00	1	170	夜間	○	単発	－	－	2～3		21:50:06	111.3	66.14	*313.58*	
2011/4/14　7:00～10	1	171	○	○	単発	1支柱	1支柱	1	Φ10程度	7:07:51	45.12	12.12	*5.79*	
2011/4/14　9:20～30	1	171	不明	○	単発			1		9:28:44	5.76	0.99	*0.2*	
2011/4/16　11:10～20	1	172	○	○	単発	3	3	1	Φ5以下	11:17:11	4.42	2.84	*1.52*	
2011/4/16　12:30～40	1	172	○	○	複数	1	3	20	Φ5以下	12:32:16	10.6	2.66	*1.96*	
2011/4/16　13:50～00	1	173	○	○	単発	2		1	Φ5以下	13:55:33	3.04	1.24	*0.12*	
2011/4/16　14:10～20	1	173	○	○	複数	－	－	20	Φ5以下	14:18:51	13.5	5.96	*6.1*	
2011/4/16　14:20～30	4	177	○	○	複数	－	－		Φ5以下	14:21:55	4.16	1.46	*2.28*	
2011/4/16 14:26	1	174	○	○	単発	－	－	10	枯れた丸太	14:26:15	50.36	44.94	*36.4*	
2011/4/16　14:30～40	1	178	○	○	複数	－	－	10	Φ5以下	14:38:28	8.06	3.92	*1.24*	
2011/4/16　14:40～50	1	175	○	○	複数	－	－	10	Φ5以下	14:47:11	4.1	1.96	*1.38*	
2011/4/16　16:10～20	1	179	○	○	複数	－	－	10	Φ5以下	16:13:43	73.9	11.24	*6.36*	

※センサー3の斜体ハッチ部分は故障による異常値

加速度型崩落検知システム　足尾長期検証実験　検知イベント時の監視カメラ状況、検証用振動計による識別結果５

崩落検知センサイベント検知期間	崩落検知センサ検知		監視カメラによる確認状況							検証用振動計による最大加速度振幅（m/s^2）				速度型振動計による検知状況
	イベント数	累積回数	カメラ画像	カメラ音声	落石タイプ	最初の打撃スパン	打撃スパン	落石個数	備考（直径φはセンチ）	トリガー時刻	振動計1	振動計2	振動計3	
2011/4/16　16:10～20	1	176	○	○	複数	－	－	10	Φ5以下	16:17:21	54.32	4.9	*4.06*	
2011/4/16　16:10～20	1	180	○	○	複数	－	－	10	Φ5以下	16:17:35	18.98	2.54	*1.56*	
2011/4/16　17:10～20	2	178	○	○	単発	－	－	1	Φ5以下	17:10:18	8.96	20.4	*3.26*	
2011/4/17　9:30～40	1	181	○	○	単発	－	－	1	Φ5以下	9:37:19	3.14	0.76	*0.24*	
2011/4/17　22:10～20	1	179	○	○	単発	－	－	1	Φ5以下	22:13:53	4.18	0.62	*0.16*	
2011/4/18　10:30～40	1	182	○	○	単発	－	－	1	Φ5以下	10:31:53	68.48	9.86	*4.56*	
2011/4/18　23:10～20	2	181	夜間	○	単発	－	－	1	Φ5以下	23:16:06	4.28	1.08	*0.52*	
2011/4/18　23:20～30	1	183	夜間	○	単発	－	－	1	Φ5以下	23:26:00	4.15	0.58	*0.2*	

※センサー3の斜体ハッチ部分は故障による異常値

■計画停電情報　　＜東京電力のHPより
2011年3月16日（水）18時～22時　　＜実際に停電している
2011年3月17日（木）15時～19時　　＜停電していない？　または、UPSのバックアップ時間内
2011年3月22日（火）15時～19時　　＜停電していない？　または、UPSのバックアップ時間内

■地震情報　（日光市足尾町で深度3以上）　＜気象庁のHPより　http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_db/shindo_index.html
2011年3月11日14:46:18.1　深度：5弱　38°6.2'N　142°51.6'E　24km　M:9.0　三陸沖
2011年3月11日14:46:18.1　深度：3　38°6.2'N　142°51.6'E　24km　M:9.0　三陸沖
2011年3月12日03:59:15.6　深度：3　36°59.1'N　138°35.8'E　8km　M:6.7　長野県北部
2011年3月19日18:56:48.0　深度：3　36°47.0'N　140°34.2'E　5km　M:6.1　茨城県北部
2011年4月11日17:16:12.0　深度：3　36°56.7'N　140°40.3'E　6km　M:7.0　福島県浜通り
2011年4月16日11:19:31.6　深度：3　36°20.4'N　139°56.7'E　79km　M:5.9　茨城県南部

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.446 January 2013

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305－8516 茨城県つくば市南原1－6 電話029－879－6754